

ZEUGEN DES WISSENS

HERAUSGEGEBEN VON
HEINZ MAIER-LEIBNITZ



V. HASE & KOEHLER

V. HASE & KOEHLER VERLAG MAINZ

Sonderdruck / Reprint

ZEUGEN DES WISSENS

Herausgegeben von
HEINZ MAIER-LEIBNITZ

XX, 1044 Seiten, mit zahlreichen Abbildungen, Ganzleinen mit Schutzumschlag

INHALT

HERMANN J. ABS: Vorwort

HEINZ MAIER-LEIBNITZ: Einleitung

GERHARD W. BECKER: Werkstoffe und ihre Prüfung – gestern, heute, morgen

GEORG MENGES: Kunststoffe – Bilanz und Aussicht

HAROLD W. LEWIS: Technological Risk

HEINZ ZEMANEK: Gedanken zum Systementwurf

Ein von Gebäude und Computer generalisierter Architekturbegriff, der auch für
Fahrzeuge und Verkehrssysteme nützlich sein könnte

WOLFGANG PRIESTER: Vom Ursprung des Universums

HERMANN HAKEN: Physik und Synergetik: Die Vielfalt der Phänomene und die Einheit
des Denkens

HANS-JOACHIM QUEISSER: Die Siliziumzeit

REIMAR LÜST: Der Vorstoß Europas in den Weltraum
Europäische und deutsche Beiträge zur Erkundung des Weltraums

HUBERT CURIEN: Pour l'Europe de la Science

ALVIN M. WEINBERG: The Problem of Big Problems Revisited

RUDOLF L. MÖSSBAUER: Universität im Umbruch

(Fortsetzung s. 3. Umschlagseite)

Eugen Seibold

Geologie im Umbruch

Einleitung

Dieser Beitrag soll zwar den derzeitigen Stand der Geologie beschreiben, kann aber nicht alle Punkte und Fachgebiete gleichmäßig behandeln. Das hängt mit den eigenen Erfahrungen des Verfassers zusammen. So wird leicht zu sehen sein, daß der Boden und der Untergrund der Meere viel Aufmerksamkeit erfahren, weite Felder der Petrologie, Geochemie, aber auch der Geophysik nur am Rande beachtet werden.

Eine einleitende Zusammenfassung mag es erleichtern, den roten Faden und die verschiedenen Ansätze des Beitrags zu erkennen:

Die Geologie will den Bau und die Geschichte der Erdrinde aus ihren Gesteinen und Fossilien ableiten. Als selbständige Wissenschaft entwickelte sie sich am Ende des 18. Jahrhunderts, als die Lücken zwischen den aus der Praxis der Bergleute stammenden Kenntnissen und der Spekulation langsam durch Beobachtungen gefüllt wurden. Bis zur Mitte unseres Jahrhunderts standen dabei die Kontinente ganz im Vordergrund.

Neue geophysikalische und meeresgeologische Methoden und Erkenntnisse führten zum ersten Umbruch, zur betonten Erforschung der *Geologie der Ozeane*. Verschiedene neue Hypothesen ermöglichten dabei erfolgreiche Forschungsstrategien. Weiterentwickelte Methoden und dieser ozeanische Ansatz greifen derzeit auch auf die Kontinente über, wobei es vor allem um die Strukturen und Vorgänge in größeren Tiefen der Erdkruste und im Erdmantel geht. Die Evolution der Lithosphäre ist zu einem so erregenden Gegenstand der Forschung geworden wie die Evolution der Biosphäre vor einem Jahrhundert.

Ein zweites Umdenken geht weniger auffallend vonstatten. Eine Wissenschaft, die im weltweiten Beschreiben der Schichtfolgen mit ihrem organischen Inhalt, der Tiefen- und Ergußgesteine oder der Gesteinsstrukturen noch viele ungelöste Aufgaben hat und die im Kern historisch denkt, hängt naturgemäß am Qualitativen. Durch neue Methoden, etwa der Geodäsie, der absoluten Altersdatierung, der Verwendung stabiler Isotopen, der experimentellen Petrologie und durch Einsatz von Computern bei der Erstellung von geologischen oder klimatologischen Modellen mehren sich derzeit *quantitative Ansätze* und Aussagen in den durch die komplexen Vorgänge und die Erdgeschichte mit ihren Singularitäten gesetzten Grenzen.

Schließlich dachte der Geologe bisher fast ausschließlich an die Vergangenheit der Erde. Dies auch, wenn er zu deren besserem Verständnis »Aktuogeologie« betrieb, d. h. heutige geologische Vorgänge etwa in Wüsten, Meeren oder an Vulkanen studierte, um Phänomene vergangener Zeitepochen besser verstehen zu lernen. Prognosen bei Bodenschätzen waren ihm zwar nicht fremd, zum Beispiel in der Exploration, doch erst im Blick auf die

Toskana sah er Fossilien und erkannte, daß sie mit lebenden Mittelmeerformen verwandt sind. Die sie einbettenden Gesteine mußten also im Meer entstanden und ursprünglich horizontal abgelagert worden sein, jüngere Schichten über älteren. Er ist damit zum eigentlichen Vater der Stratigraphie geworden.

Die *Geogenie*, die Lehre von der Entstehung der Welt, hatte natürlich den mosaischen Schöpfungsbericht als Grundlage. Zu nennen wäre hier unter anderem Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716). Eine besondere Rolle spielte in diesem Zusammenhang die biblische Sintflut. Noch 1823 veröffentlichte William Buckland, Oxford, (1784–1856) das Werk »The Relics of the Flood«, der wohl letzte wichtige Versuch, Geologie mit der Theologie zu kombinieren.

Am Ende des 18. Jahrhunderts jedoch begannen sich Beobachtungen und Theorien mehr und mehr zu durchdringen. Ein Musterbeispiel bleibt der Streit zwischen den Neptunisten und den Plutonisten, d. h. zwischen Abraham Gottlob Werner (1750–1817) und James Hutton (1727–1797) mit ihren jeweiligen Anhängern. Nach den Neptunisten, zu denen auch mit gewissen Einschränkungen Johann Wolfgang von Goethe gehörte, wurden alle Gesteine der Erdrinde, also auch die kristallinen vom Granit bis zum Basalt, im Wasser abgesetzt. Die Plutonisten nahmen an, daß die Erde im wesentlichen von Kräften aus ihrem Innern gestaltet wird, der Basalt etwa vulkanischer Entstehung sei. Die Ausweitung der anfänglich jeweils lokal geprägten Beobachtungen hat in der Folge Irrtümer beider Seiten korrigiert und Wesentliches bestätigt. Das erwähnte heroische Zeitalter der Geologie (um 1790 bis um 1830) brach damit an. Es wurde damals für vieles Grund gelegt, was zum Teil noch heute diskutiert werden muß:

Vom *Neptunismus-/Plutonismus*-Streit bleibt uns vom unbekannten Charakter eines Urozeans bis zur Entstehung mancher Erzlagerstätten immer noch manches offen.

Aus Fossilfunden im Pariser Becken und Kenntnis der vergleichenden Anatomie entwickelten Alexandre Brongniart (1770–1847) und Georges Cuvier (1769–1832), aus Beobachtungen in England William Smith (1769–1839) die paläontologische *Stratigraphie*. In wenigen Jahrzehnten wurden die wesentlichen erdgeschichtlichen Einheiten definiert, die Kreideformation 1822, die Juraformation 1829, die Trias 1834 usw. (Tab. 1). Dies wurde eine der Grundlagen zum Erstellen geologischer Karten, ein Feld, das sich geradezu explosiv entwickelte. Auf diesen Grundlagen diskutiert man immer noch Grenzziehungen, zeitliche Korrelierung, verfeinert man Methoden wie Aussagen.

Eine zusammenfassende Darstellung der globalen *Tektonik* mußte bis ans Ende des 19. Jahrhunderts warten, bis Eduard Suess (1831–1914) »Das Antlitz der Erde« schrieb (1885–1909). Schräg gestellte Schichten als Beginn einer Verformung waren schon Stensen aufgefallen, meist aber dann, wie durch Hutton, auf vulkanische Kräfte zurückgeführt worden. Noch Horace Benedict de Saussure (1740–1799) dachte bei schräg gestellten Schichten zunächst an Kristallisationsformen aus dem Urozean, bis er aus steil gestellten alpinen Konglomeraten andere Schlüsse zog.

Die Ansicht, daß heute wirkende Prozesse die Schlüssel für das Verständnis der Vorzeit seien und daß sie sich langsam auswirken (*Aktualismus* und *Uniformitarianismus*), wurde vor allem durch Charles Lyell (1797–1875) vertreten und weit verbreitet. Cuviers Katastrophentheorie mit ihren plötzlichen Änderungen der Meere wie der Organismen stand indessen lange im Vordergrund, vor allem vor dem Erscheinen von Darwins »The origin

Tab. 1: Erdgeschichtliche Gliederung mit absoluten Altersangaben (Millionen Jahre) (nach Odin [1982], Odin in Seibold & Meulenkamp [1984], u. a.)

Känozoikum	0	Paläozoikum	
Holozän	-0,01	Perm	-290 (+10, -5)
Pleistozän	-1,8 bis 2	Karbon	-360 (+5, -10)
Jungtertiär		Devon	-400 (+10, -5)
Pliozän		Silur	-420 (+10, -5)
Miozän	-23 (+1, -0,5)	Ordoviz	-495 (+10, -5)
Alttertiär		Kambrium	-530 (±10)
Oligozän		Präkambrium	
Eozän		Proterozoikum	etwa 2500
Paläozän	65 (+1, -1,5)	Archaikum	
Mesozoikum		erste Lebens-	3800
Kreide	-130 (±3)	spuren	
Jura	-204 (±4)	Erdentstehung	4500
Trias	-245 (±5)		

of species« im Jahre 1859. Und sie lebt, wie noch gezeigt werden soll, heute wieder auf, nicht nur bei den Kreationisten.

Es ist leicht einzusehen, daß bei dieser Entwicklung der Geologie das Festland ganz im Vordergrund stand. Wir leben auf und weitgehend von ihm. Auch heute noch gibt es große Lücken bei der geologischen Kartierung, in entlegenen Gebieten, bei Überdeckung des Untergrunds durch Eis, Wüstensand und andere Verwitterungsprodukte oder durch dichte Vegetation, doch auch heute noch genügen vielfach »mente et malleo«, um diese Lücken zu verkleinern.

Geschichtliches zur Meeresgeologie

Das Meer, vor allem die Tiefsee, verlangen zum Auffüllen solcher Lücken aufwendige Schiffe und Geräte. Noch vor zwei Jahrzehnten hörten alle geologischen Karten an der Küste auf, wo das blaue Meer begann, allenfalls mit ein paar Tiefenzahlen und -linien versehen. Und selbst der wichtigste Umbruch in der Geologie unseres Jahrhunderts, der Wandel vom *Fixismus* zum *Mobilismus*, wurde 50 Jahre lang abgelehnt, nachdem Alfred Wegener schon 1912 seine Hypothese der Kontinentalverschiebung veröffentlicht hatte. Er sah auf die Kontinente – und mußte dies mangels geologischer Daten aus den Ozeanen auch tun. Bei ihm spielen die Kontinente die aktive Rolle. Sie pflügen den Untergrund,

auch den der Ozeane, wenn sie nach Westen und weg von den Polen drifteten. An ihrer Vorderseite bildeten sich als Bugwellen Gebirge wie die Anden, im Kielwasser bröckelten die Kontinente als Inselbögen ab. Er brachte zahlreiche gute Belege aus der Geologie, Paläoklimatologie und der vorzeitlichen Pflanzen- und Tierwelt der Kontinente bei und konnte trotzdem nur wenige Fachkollegen überzeugen. Die endgültigen Beweise kamen in den fünfziger und sechziger Jahren aus dem Meer. Warum erst so spät? Weil die Meeresgeologie mit dem Einschluß der Tiefsee gerade erst 100 Jahre alt geworden und bis zum Zweiten Weltkrieg eher als Stiefkind aufgewachsen ist.

Erst mit der Fahrt der »Challenger« (1872–1876) begann wirklich die weltweite *meereskundliche Erkundungsphase*, die bis zum Ersten Weltkrieg dauerte. Davor gab es nur sporadische Beobachtungen, an den Küsten, im Mittelmeer wie durch den wohl ersten Meeresgeologen, Luigi Ferdinando Marsigli (1658–1730), an pazifischen Koralleninseln wie durch Charles Darwin auf der Fahrt der »Beagle« (1831–1836). 1845 stellte Alexander von Humboldt in seinem »Kosmos« fest, daß die Tiefen der Ozeane so gut wie unbekannt seien. Wenige Jahre später wurde die erste Tiefenkarte des Nordatlantiks veröffentlicht, gefördert durch die Lotungen zur Verlegung der Seekabel zwischen Europa und Amerika. Trotzdem konnte Johannes Walther, der damals bedeutendste deutsche Meeresgeologe, noch 1893 schreiben:

»Man würde auf dem Meeresgrund Eisenbahnen nach allen Richtungen von Kontinent zu Kontinent legen können, ohne irgendwo auf Schwierigkeiten zu stoßen.«

Die englische »Challenger« legte 69 000 Seemeilen zurück und machte im Atlantischen, Indischen und Pazifischen Ozean 362 Meßstationen, also sehr wenige Lotungen. Trotzdem erwuchs daraus die erste Karte mit der Verbreitung der Tiefseesedimente, deren Klassifikation dazuhin praktisch noch heute gültig ist.

Die zweite Phase der Meeresforschung brachte zwischen den beiden Weltkriegen das *systematische und multidisziplinäre Aufnehmen großer Ozeanräume*. Dabei ragt die deutsche »Meteor«-Expedition in den Atlantik (20° N–63° S) heraus (1925–1927). Auf 14 Querprofilen und fast 68 000 Seemeilen konnte jetzt akustisch gelotet werden. Über 60 000 Echolotungen entschleierten den mittelatlantischen Rücken und seinen Zentralgraben. Die geborgenen Sedimente wurden in Fraktionen und Komponenten aufgeteilt. Grundlegendes zum Karbonathaushalt im Meer wurde erkannt. Erste Schritte in die Stratigraphie der Tiefsee waren erfolgreich.

1947 begann eine dritte Phase mit zahlreichen *fachspezifischen Expeditionen*. Die schwedische »Albatross« (1947/48) zog beispielsweise weltweit Tiefseekerne, mit dem neuen Kolbenlot bis 15 m Länge, und begründete damit die Stratigraphie des Pleistozäns, der letzten Eiszeit (Tab. 1), aus den Ozeanen. Die gleichfalls berühmt gewordenen Schiffe der US-amerikanischen ozeanographischen Forschungsinstitutionen wie Scripps, Woods Hole und vor allem Lamont fügten aus allen Meeren viele Sedimentkerne hinzu und maßen auf zahllosen Profilen mit dem Echographen nicht nur kontinuierlich die Meerestiefen, sondern erkundeten auch mit Hilfe der Reflexionsseismik und anderer geophysikalischer Methoden, magnetischen und gravimetrischen, den flacheren und tieferen Untergrund.

Neue Hypothesen: Auseinanderdriften der Ozeanböden und Plattentektonik

Einige wenige Beobachtungen voraus:

1. Der mittellatantische Rücken ist keine singuläre Bodenform. Ein ähnlicher zentraler oder seitlich versetzter Rücken ist in allen Ozeanen zu finden, einschließlich der Grabenregion, heute die Riftzone genannt, auf dem Rückenkamm (Abb. 1). Ein morphologischer Zug, der 60 000 km lang ist und rund 150 Millionen km² einnimmt, also die Fläche der Kontinente, muß daher eine globale Erscheinung sein, lockt also zu einer einheitlichen Erklärung. Ähnliches gilt für die Tiefseegesenke.

2. Genauere Ortsbestimmungen der Erdbebenherde ergaben eine Häufung in denselben Zonen, dabei flache Herde (bis 60 km Tiefe) unter den mittelozeanischen Rücken, flache, intermediäre und tiefe (bis 700 km Tiefe) im Bereich der Tiefseegesenke (s. Abb. 13).

3. Aktiver und schlafender Vulkanismus sind ähnlich wie die Erdbebenherde verteilt.

4. Die Reflexionsseismik erbrachte zwei große Überraschungen. Die Sedimente sind in den Ozeanen im Durchschnitt nur um 500 m mächtig. Das widerspricht der Vorstellung alter Ozeane. Nach Abschätzungen der derzeitigen jährlichen Sedimentzufuhr aus den Kontinenten oder aus Organismenresten müßte sich ein recht junges Alter der Ozeane ergeben. Und zweitens: Die Sedimente dünnen in Richtung der mittelozeanischen Rücken aus. Sie fehlen dort sogar, und Basalt in seinen typischen Formen submariner Ergüsse

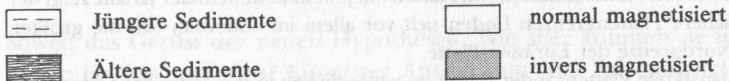
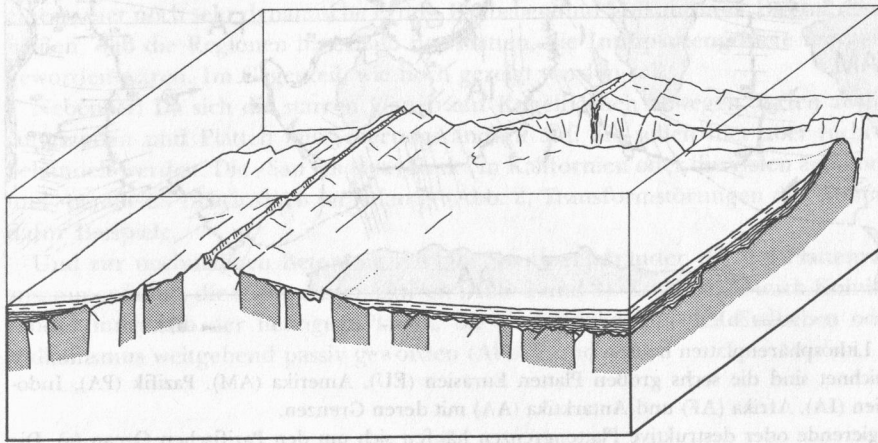


Abb. 1: Schema eines mittelozeanischen Rückens: Riftregion mit zentralem Graben, Absinken durch Abkühlen nach den Seiten, Ausbildung der magnetischen Streifenmuster in der ozeanischen Kruste, zunehmende Sedimentmächtigkeiten. Transformstörung versetzt die Rückenachse. (Ohne Maßstab, nach Trümpy, 1985, S. 16.)

bildet dort den Meeresboden (Abb. 1). Das ergaben Dredgezüge, Unterwasserfotos und schließlich Beobachtungen aus Tauchbooten. Die Rücken müssen also die jüngsten Teile der Ozeane sein.

5. Die Grenze zwischen der Kruste und dem Mantel der Erde wird durch einen Diskontinuitätsbereich seismischer Wellengeschwindigkeiten markiert, der sogenannten Mohorovicic-Diskontinuität oder kurz der »Moho«. Unter den Kontinenten liegt die Moho um 30 km tief, unter Gebirgen bis 60 km, also grob spiegelbildlich zum Relief. Dies wird auf ein isostatisches Gleichgewicht zurückgeführt, wonach die leichtere Kruste auf der schwereren Unterlage schwimmt und um so tiefer in diese eintaucht, je höher die Kruste aufragt. Unter den Ozeanen liegt die Moho aber nur 5–10 km unter dem Meeresboden,

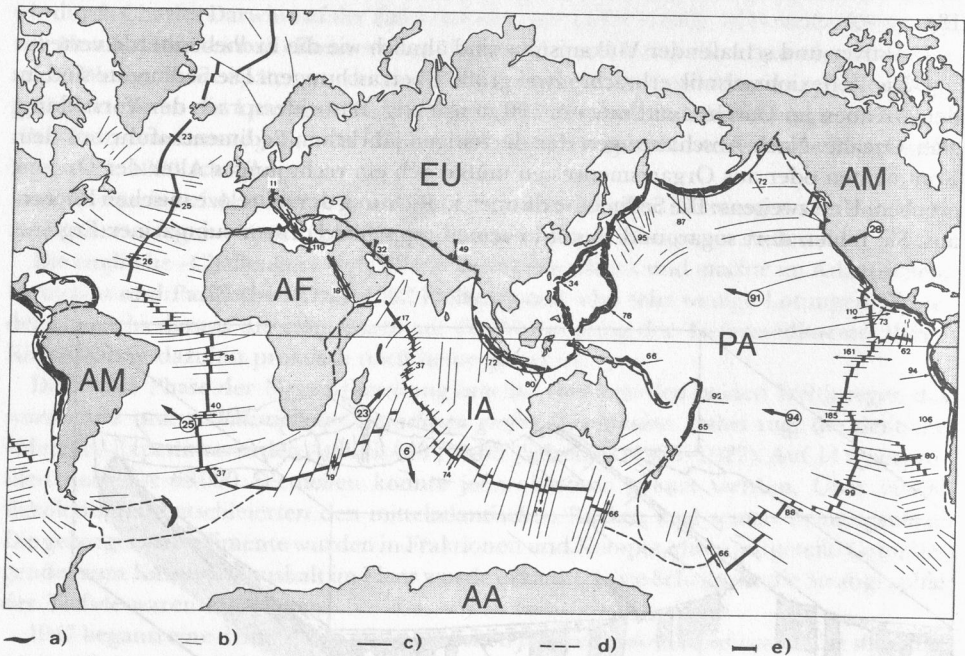


Abb. 2: Lithosphärenplatten heute.

Eingezeichnet sind die sechs großen Platten Eurasien (EU), Amerika (AM), Pazifik (PA), Indo-Australien (IA), Afrika (AF) und Antarktika (AA) mit deren Grenzen.

Konvergierende oder destruktive Plattengrenzen häufen sich um den Pazifischen Ozean (a). Die Dreiecke liegen auf der höheren Platte. Kollision von Platten mit jeweils kontinentaler Kruste zeigt der Himalaya-Typ (c). Unsichere Plattengrenzen finden sich vor allem im Südozean (d), die größten Ungewißheiten in der Nordgrenze der Eurasien-Platte.

Divergierende oder konstruktive Plattenränder liegen im wesentlichen in der Mitte der Ozeane (e). Transformstörungen (b) sind dort besonders deutlich nachzuweisen. Kleine Zahlen: Relativbewegungen von Platten in mm/Jahr. Große Zahlen: Plattenwanderungen über »Hot Spots« aus dem Erdmantel, z. B. Hawaii oder Yellowstone, in mm/Jahr.

(Nach Trümpy, 1985, S. 13).

und ausgerechnet in den am höchsten aufragenden untermeerischen Gebirgen, den genannten Rücken, wird die Moho noch flacher.

Wie sind alle diese Beobachtungen zu deuten? Es ist faszinierend zu sehen, wie in wenigen Jahren eine einheitliche Erklärung gefunden wurde, im wesentlichen durch das Zusammenwirken herausragender Geologen und Geophysiker in Lamont bei New York, in Princeton und im englischen Cambridge:

1960 stellte Harry Hess nach Diskussionen vor allem mit Bruce Heezen in einem Bericht seine Hypothese vor, der Robert Dietz 1961 den Namen »Sea floor spreading« gab. Sie wuchs rasch in die Vorstellungen einer »Plattentektonik« hinein.

Danach unterteilt man die Erdrinde in 6 große – und zahlreiche weitere kleinere – Platten (Abb. 2). Sie sind relativ steif und gehören zur rund 100 km mächtigen Lithosphäre, umfassen also die ganze Erdkruste und Teile des Oberen Erdmantels. Die Lithosphärenplatten lagern auf der duktileren Asthenosphäre und werden mit dieser bewegt. Thermisch bedingte Konvektionsströme im Erdmantel besorgen dies. Sie steigen unter den mittelozeanischen Rücken auf und strömen seitlich ab. Dort divergieren also die Platten (s. Abb. 1). Wo Konvektionsströme abtauchen, konvergieren Platten und wird eine davon in den sog. Subduktionszonen mit in den Erdmantel hinuntergeschleppt. Je nach regionaler Situation türmen sich dadurch auf dem Festland Gebirge wie der Himalaya auf, bilden sich Tiefseegesenke vor Gebirgen wie den Anden oder Tiefseegesenke mit Inselketten wie um Japan. Das Wesentliche: Die Lithosphäre wird als Teppich gezogen und trägt dabei ozeanische wie kontinentale Kruste. Die Kontinente sind also im Gegensatz zur Annahme Wegeners passiv. An den Plattenrändern häufen sich dagegen die Zeichen für eine immer noch sehr dynamische Erde – Erdbeben und Vulkanismus. Das soll aber nicht heißen, daß die Regionen innerhalb der Platten, die Intraplattengebiete uninteressant geworden wären. Im Gegenteil, wie noch gezeigt werden soll.

Nebenbei: Da sich die starren Platten auf Kugelflächen bewegen, treten auch Scherungszonen und Platten mit Scherungsrändern auf. Sie sollen hier aber nicht näher behandelt werden. Die »San Andreas Fault« in Kalifornien oder die vielen äquatornahen und -parallelen Bruchzonen im Atlantik (Abb. 2, Transformstörungen der Abb. 1) sind dafür Beispiele.

Und zur nochmaligen Betonung: Es gibt Kontinentalränder, die mit Plattenrändern zusammenfallen, die sogenannten aktiven (Abb. 2 und 3). Es gibt aber auch Kontinentalränder innerhalb der heutigen Platten. Sie sind hinsichtlich der Erdbeben oder des Vulkanismus weitgehend passiv geworden (Abb. 2 und 4).

Beweise

Soweit das Gerüst der neuen Hypothesen. Wie aber konnten sie in ihren wesentlichen Zügen bewiesen werden? Ein erster Anstoß kam vom Paläomagnetismus: Verschiedene Mineralpartikel werden vom jeweiligen erdmagnetischen Feld beeinflusst. In der Erdgeschichte hat dieses sich teilweise – übrigens aus noch unbekannten Ursachen – dramatisch verändert. Der magnetische Nordpol konnte – und dies relativ rasch – zum Südpol werden, und umgekehrt. Die Dauer der Perioden des heutigen, d. h. »normalen« Feldes

wie auch des inversen, d. h. umgekehrten, liegen zwischen rund 700 000 und 2 Millionen Jahren. Dies alles und das absolute Alter dieser Umkehrungen hat man im wesentlichen aus datierbaren Lavaströmen auf dem Festland erarbeitet.

Ist diese wiederholte *Feldumkehr* auch an Tiefseebasalten festzustellen? Sie dringen unter den mittelozeanischen Rücken auf und werden – bleibend – in Richtung des jeweiligen Erdfeldes magnetisiert, wenn sie unter den sogenannten Curie-Punkt, d. h. rund 525 °C abkühlen. Der von den Rücken weggezogene Lithosphären-Teppich müßte daher Zonen dieser verschiedenen Polarität und diese einigermaßen parallel und symmetrisch zur Rückenachse aufweisen (Abb. 1).

In der Tat haben das kontinuierliche magnetische Messungen gezeigt. Zu den Pionieren gehören Vine und Matthews (1963, Nature). Das absolute Alter dieser magnetisierten Gesteinsstreifen konnte dann mit dem erwähnten Kalender vom Festland bestimmt werden, dadurch auch das jeweilige Alter des durch die Basalte gebildeten Meeresbodens – und damit die Geschwindigkeit des Auseinanderdriftens des Meeresbodens. In vielen, auch sehr komplizierten Fällen hat sich diese Methode bewährt, eines der erstaunlichen Beispiele, bei denen die Grundlagen kaum bekannt sind – weder der Mechanismus und die Ursache der Feldumkehr noch der Sitz der magnetischen Anomalien – und man trotzdem damit arbeiten kann.

In den drei genannten Zentren der marinen Geowissenschaften war man nach vielen, oft heftigen Diskussionen schließlich so weitgehend überzeugt, daß 1968 die wesentlichen

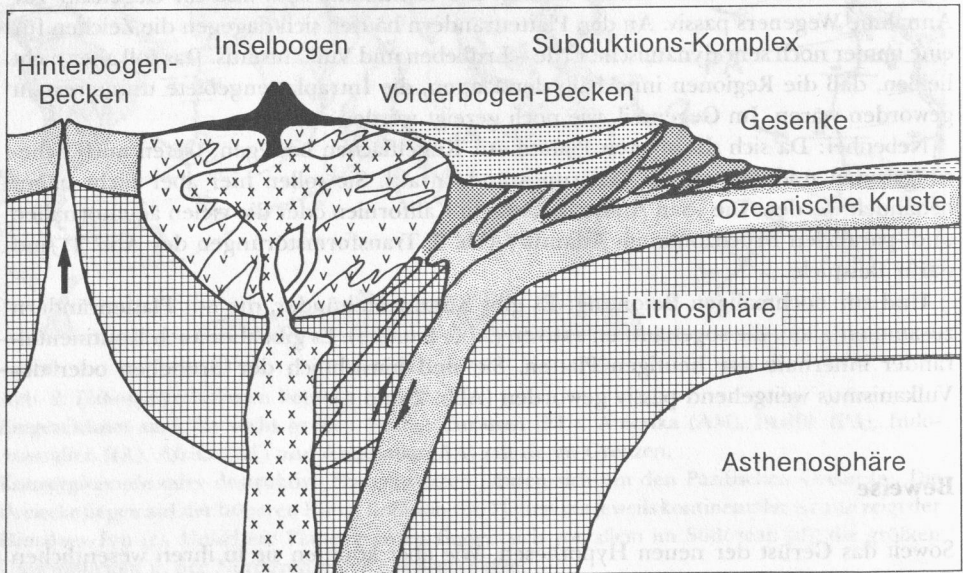


Abb. 3: Konvergenzrand des Marianentyps.

Über der Subduktionszone, in der hier ozeanische Kruste an ozeanische stößt, bauen sich vulkanische Inselbögen hoch. Landwärts (links) bilden sich Hinterbogenbecken, deren Entstehung noch unklar ist. Unter anderem wird dabei eine Situation wie im Schema der Abb. 5d diskutiert.

(Nach Seibold und Berger, 1982, S. 43).

Arbeiten zur Plattentektonik erscheinen konnten – genau in dem Jahr, in dem das *Deep Sea Drilling Project* (DSDP) mit der »Glomar Challenger« begann. Die für das Projekt Verantwortlichen fanden daher eine ungemein erregende neue Vorstellung als Strategie für den Ansatz der Bohrungen vor und begannen die Kampagne mit den größten Hoffnungen. Sie wurden erfüllt. Die Vorstellungen wurden bestätigt.

Einen ersten Durchbruch brachte der Bohrabschnitt 3 (Dezember 1968–Februar 1969). Er plazierte Bohrungen auf beiden Seiten des mittelozeanischen Rückens im Südatlantik und zeigte, daß das paläomagnetisch bestimmte Alter der Basalte und das mikropaläontologische Alter der ersten marinen Sedimente darüber gut übereinstimmen. Zudem nahm das Alter der Basalte, also der neu gebildeten ozeanischen Kruste, zu den Kontinenten hin tatsächlich zu. Viele – auch ich – blieben zunächst skeptisch. War es Zufall? Wie sah es in größerer Kontinentnähe aus? Als ich – 1975 – selbst an Bord der »Glomar Challenger« ging, hatte ich eine soeben erstellte »Streifen«-Karte des Atlantischen Ozeans mit dem paläomagnetisch bestimmten Alter seiner Kruste unter den Sedimenten mitnehmen können. Der von uns vorgesehene Bohrpunkt 367 im Senegal-Becken lag auf der Karte im Bereich jurassischen Alters. Die Bohrung brachte aus einer Wassertiefe von 4748 m und nach Durchteufen von 1146 m Sedimenten tatsächlich Schichten mit jurassischen Mikrofossilien und darunter basaltische Kruste an Bord. Wenn also mehrfach – und im

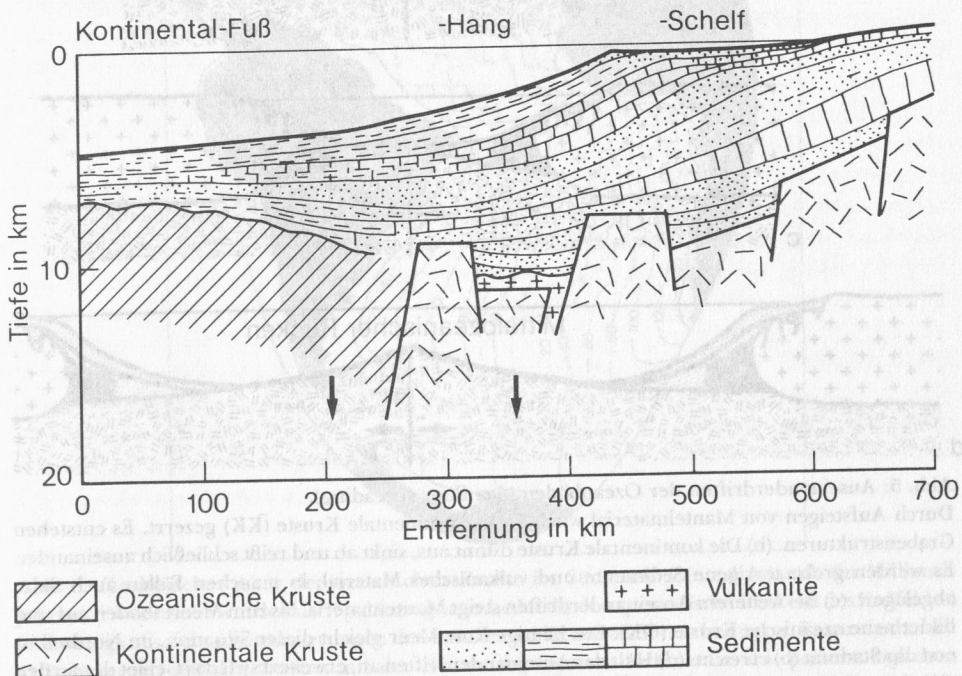


Abb. 4: Schema eines passiven (Intraplatten-) Kontinentalrands.

Unter der jüngeren Sedimentdecke verbirgt sich hier das Anfangsstadium, das Auseinanderdriften zweier Kontinente nach der Vorstellung der Abb. 5.

(Nach Seibold und Berger, 1982, S. 42).

folgenden fast an allen Bohrpunkten, die den Basalt erreichten – so völlig unterschiedliche und voneinander unabhängige Verfahren der Altersbestimmung zum gleichen Ergebnis führten, so ist dies ein wohl schlüssiger Beweis für die unterlegten Vorstellungen. Bisher sind dabei keine vorjurassischen Schichten erbohrt worden.

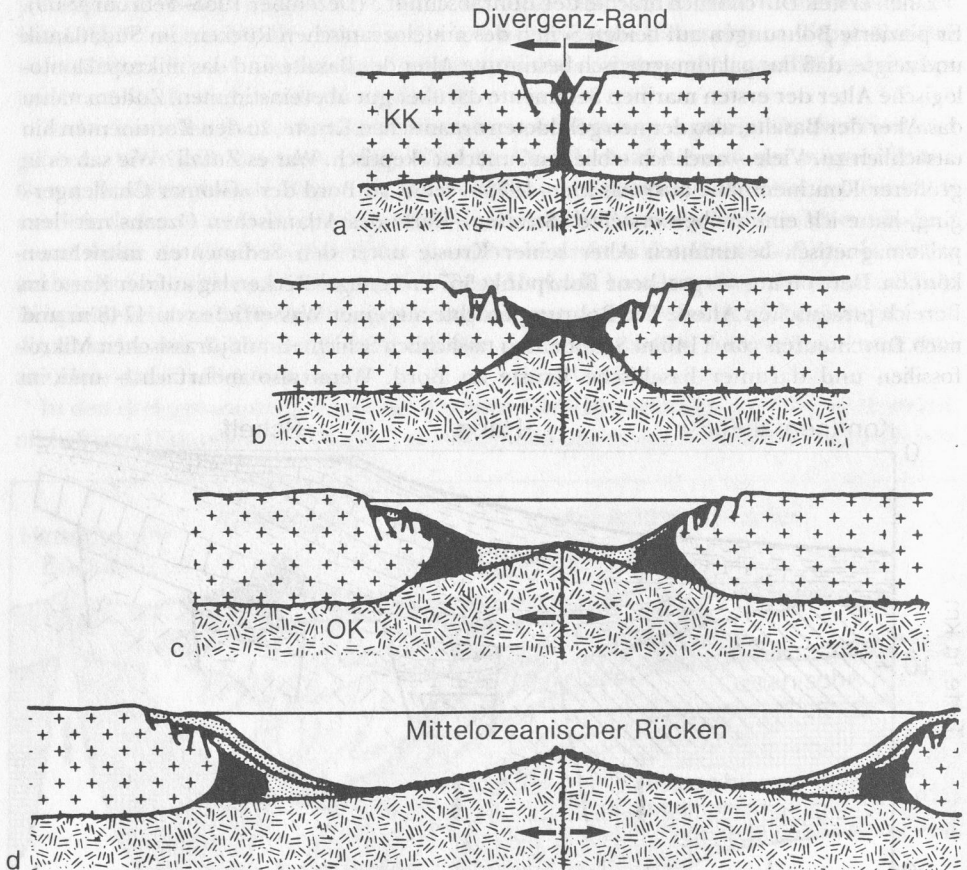


Abb. 5: Auseinanderdriften der Ozeanböden (Sea floor spreading).

Durch Aufsteigen von Mantelmaterial wird (a) die kontinentale Kruste (KK) gezerrt. Es entstehen Grabenstrukturen. (b) Die kontinentale Kruste dünnt aus, sinkt ab und reißt schließlich auseinander. Es werden grobe terrigene Sedimente und vulkanisches Material, in manchen Fällen auch Salze abgelagert. (c) Bei weiterem Auseinanderdriften steigt Mantelmaterial bis zum Meeresboden auf und bildet neue ozeanische Kruste (OK). Das heutige Rote Meer gleicht dieser Situation, im Nordteil ist erst das Stadium (b) erreicht. (d) Hält das Auseinanderdriften an, erweitert sich das Gebiet der an den mittelozeanischen Rücken neu gebildeten ozeanischen Kruste. Sedimente lagern sich darauf ab, vor allem an den beiden Kontinentalrändern. Dies sind – nicht maßstabgerecht – die Verhältnisse im heutigen Atlantik.

(Nach Seibold und Berger, 1982, S. 38).

Konsequenzen

Die Ermittlung des Alters der Kruste unter den Ozeanen läßt auch die Rekonstruktion ihrer *Grundrisse* in der Erdgeschichte zurückverfolgen, damit auch die Lage der Kontinente. Abb. 6 zeigt das für den Atlantik. Dies führt zu der Vorstellung, daß die Kontinente in der Permzeit, d.h. vor rund 250 Millionen Jahren, einen einheitlichen Urkontinent

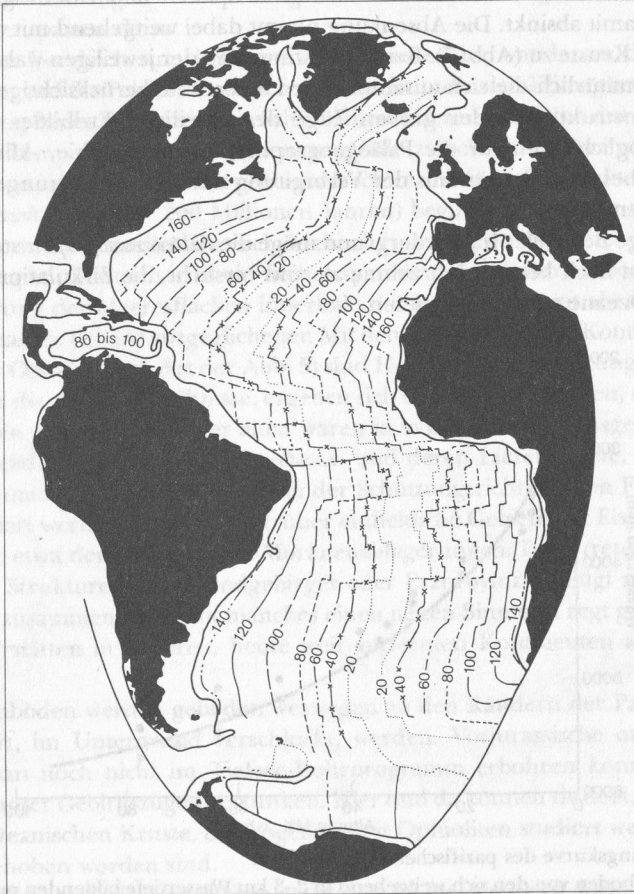


Abb. 6: Geologisches Alter der ozeanischen Kruste im Süd- und Zentral-Atlantik (in Millionen Jahren). Dieses Alter wurde durch paläomagnetische Methoden (periodische Umkehr des Erdfeldes) und wenige absolute Altersdatierungen der Basalte und Extrapolationen bestimmt. Es wurde danach in Bohrkernen mit den ältesten auf der Kruste abgelagerten Sedimenten mit paläontologischen Methoden vielfach bestätigt. Die Karte zeigt das allmähliche seitliche Wachstum des Atlantiks, läßt aber auch, durch Zusammenrücken, dessen Rekonstruktion für die Erdgeschichte der letzten rund 160 Millionen Jahre zu.

(Nach Seibold und Berger, 1982, S. 31).

gebildet haben mußten. In dieser Hinsicht hat also Wegener recht behalten. Seine »Pangaea« gab es wirklich (Abb. 8). Sie begann dann in der Triaszeit zu zerbrechen, an Divergenzrändern, wie in Abb. 5 dargestellt. Es geht aus ihr auch die schematische Entwicklung des atlantischen Untergrunds vor Nordwest-Afrika seit der Jurazeit hervor.

Doch nicht nur die Grundrisse der Ozeane lassen sich jetzt rekonstruieren, sondern auch die Tiefenverhältnisse, die *Aufrisse* in den entsprechenden Erdperioden. Dies geht darauf zurück, daß sich die ozeanische Kruste beim Auseinanderdriften durch engen Kontakt mit dem Meerwasser am Boden und in Spalten und Höhlungen des Basalts abkühlt und damit absinkt. Die Absenkung nimmt dabei weitgehend mit der Wurzel aus dem Alter der Kruste zu (Abb. 7). Bei der Bestimmung der jeweiligen wahren Meerestiefen muß man natürlich die sich ansammelnden Sedimente berücksichtigen.

Diese Rekonstruktionen der groben Züge des jeweiligen Erdbildes eröffnen jetzt ungeahnte Möglichkeiten für die Paläogeographie, -oceanographie, -klimatologie und damit für ein besseres Verständnis der Verbreitung und der Wanderungen von Floren- und Faunenelementen.

Einige wenige Beispiele: Im Vordergrund möge die *Paläooceanographie* stehen. Sie ist im modernen Sinn noch keine 2 Jahrzehnte alt und versucht, die Zirkulation, Chemie und Biologie der Ozeane zu rekonstruieren.

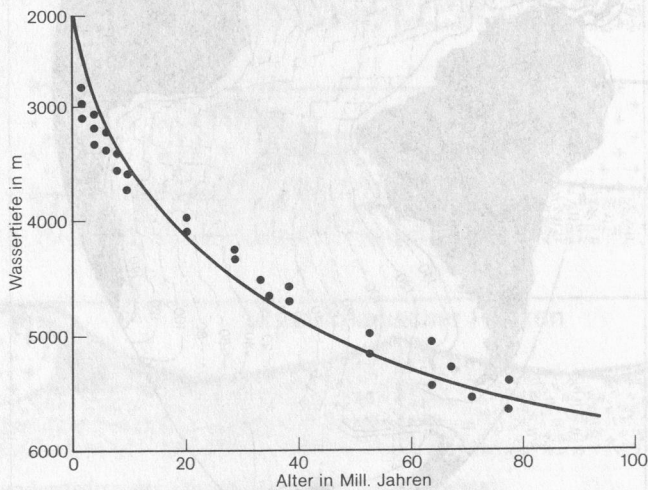


Abb. 7: Absenkungskurve des pazifischen Ozeanbodens.

Wenn der Ozeanboden von den sich weitgehend in 2–3 km Wassertiefe bildenden mittelozeanischen Rücken seitlich wegdriftet, kühlt er sich ab und senkt sich – um 1000 m in den ersten 10 Millionen Jahren, um weitere in den nächsten rund 26 Millionen Jahren usw.

Die tatsächlichen Messungen (Punkte) stimmen gut mit der (von Sclater et al., 1971) hypothetisch berechneten Kurve für eine 100 km mächtige Lithosphäre überein. Ähnliche Kurven gibt es für den Atlantik und Indik. Man kann daher durch die Kombination von Grundrissen wie in Abb. 6 und Kurven wie in dieser Abb. 7 den jeweiligen früheren Grund- und Aufriß der Ozeanbecken rekonstruieren.

(Vereinfacht nach Seibold und Berger, 1982, S. 19).

Abb. 8 zeigt eine Rekonstruktion des zusammenhängenden Großkontinents, der Pangaea, zu Beginn der Jurazeit, vor rund 200 Millionen Jahren (Tabelle 1). Von dem Panthalassa-Ozean stößt die Tethys, der Vorläufer des Mittelmeeres, keilförmig in die Landmassen von Laurasia im Norden und Gondwana im Süden hinein. Altbekannte Klimaanzeiger, die vor allem von den geographischen Breiten abhängen, passen gut in dieses Bild: der Tropengürtel mit seinen Riffforallen und seiner Lateritverwitterung, die beiden polwärts anschließenden ariden Gürtel mit Steinsalz, Gips, Rotschichten um den eingezeichneten – damaligen – 30. Breitengrad. Auch die paläomagnetischen Bestimmungen der Pollagen passen dazu.

Wie leicht im Vergleich zum heutigen Bild zu sehen ist, wanderten die Kontinente seitdem in bezug auf die Pole, weshalb sich auch die latitudinalen Klimagürtel verschoben. Die Ausdehnung dieser Gürtel und die Schärfe ihrer Grenzen sind von der durchschnittlichen globalen Temperatur, vom Temperaturgefälle zwischen Äquator und Polen, vom Relief der Kontinente und anderen geologisch schwer zu fassenden Faktoren abhängig.

Mit der *Jurazeit* (vor rund 200 Millionen Jahren) beginnt ausgeprägt der Zerfall der Pangaea. Der zentrale Atlantik öffnet sich, wie auch (vor rund 140 Millionen Jahren, Abb. 9) die Panama-Region. Dadurch wird ein weltumspannender Äquatorialstrom möglich. Mit der Vergrößerung der Meeresflächen innerhalb der Pangaea nimmt aber die Kontinentalität des Klimas ab. Es wird ausgeglichener. Mit dem Zerschneiden der Kontinente und der Bildung neuer Ozeane (nach Art der Abb. 5) sind Hebungen und Senkungen verbunden, verändern sich die Abflußverhältnisse, ergeben sich ökologische Nischen, die zur Neubildung von Arten anregen. Viele der alten waren ja in der Permzeit ausgestorben.

Zerrissen werden dabei auch *Sedimentbecken* und deren Liefergebiete. Deren Zusammenhänge können vom Material oder von der Schüttungsrichtung von Flußsedimenten her rekonstruiert werden. Es gab auch früher einheitliche Gebiete mit Eisbedeckung und deren Spuren, etwa den Tilliten, d. h. Moränenablagerungen. Dazu treten ursprünglich durchgängige Strukturen des Grundgebirges oder Erzprovinzen. Fügt man die Bruchstücke wieder zusammen, so ergibt manches einen neuen Sinn und regt gar zur Prospektion auf Lagerstätten in anderen, heute weit entfernten Kontinenten an, etwa in der Antarktis.

Neue Ozeanböden werden gebildet, weswegen an den Rändern der Panthalassa auch alte subduziert, im Untergrund verschluckt, werden. Vorjurassische ozeanische Sedimente, die man noch nicht im Tiefsee-Bohrprogramm erbohren konnte, sind dabei vielleicht alle unter Gebirgszügen versunken. Hier und da können sie dort, zusammen mit Spänen der ozeanischen Kruste, den sogenannten Ophioliten studiert werden, wenn sie später hochgehoben worden sind.

Das insgesamt ausgeglichene Klima setzt sich in die *Kreidezeit* fort. Es gab damals Korallenriffe und manche Landpflanzen, die bis 1500 km näher an den Polen lagen als heute. Es war nicht nur generell wärmer als heute (um 6 °C, oder gar 14 °C), sondern auch speziell in Polargebieten, die kein Dauereis hatten. Die verschiedenen bisher vorliegenden globalen Klimamodelle für die Kreidezeit können all dies noch nicht erklären.

Teilweise mögen das ausgeglichene Klima und die erhöhten Temperaturen dadurch erklärt werden können, daß das Meer weite Teile der Kontinente überflutet hatte (etwa die sogenannte *Cenoman-Transgression* vor rund 93 Millionen Jahren). Der Meeresspiegel soll

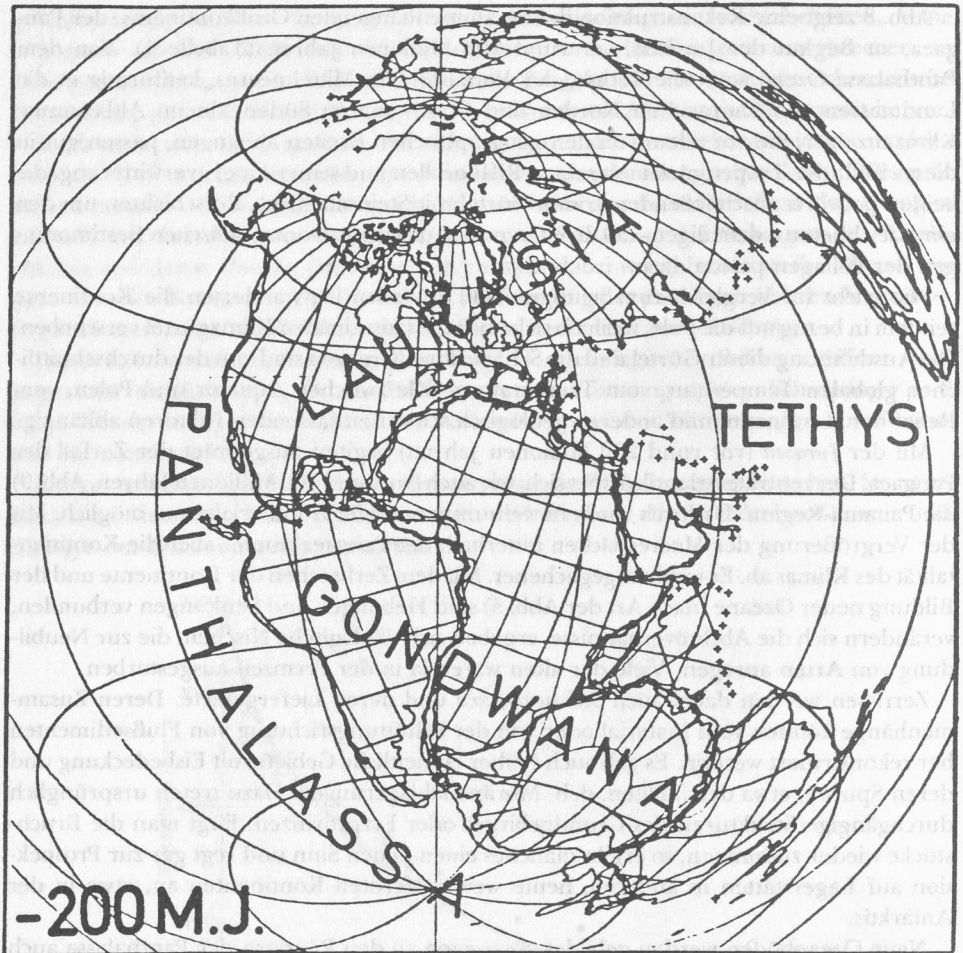


Abb. 8: Verteilung der Ozeane und Kontinente vor 200 Millionen Jahren, zu Beginn der Jurazeit. (Flächentreue Lambert-Projektion nach Smith & Briden, 1977).

damals um über 200 m höher gelegen haben. Heute würde ein derartiger Anstieg 37 Mio. km² Land, d. h. ein Viertel des Festlandes, bedecken! Nun reflektiert die Meeresoberfläche 4–10 Prozent des auf sie einfallenden Lichts, dunkle Wälder um 10 Prozent, Wüsten um 30 Prozent, Eis und Schnee gar 80 Prozent. Transgressionen machen also die Erdoberfläche »dunkler«, erwärmen sie. Es ist möglich, daß dieser ungewöhnlich starke Anstieg des Meeresspiegels mit einer Periode schnelleren Auseinanderdriftens der Meeresböden zusammenfällt. Dadurch hätte sich das Volumen der mittelozeanischen Rücken vergrößert, das Ozeanvolumen also verkleinert.

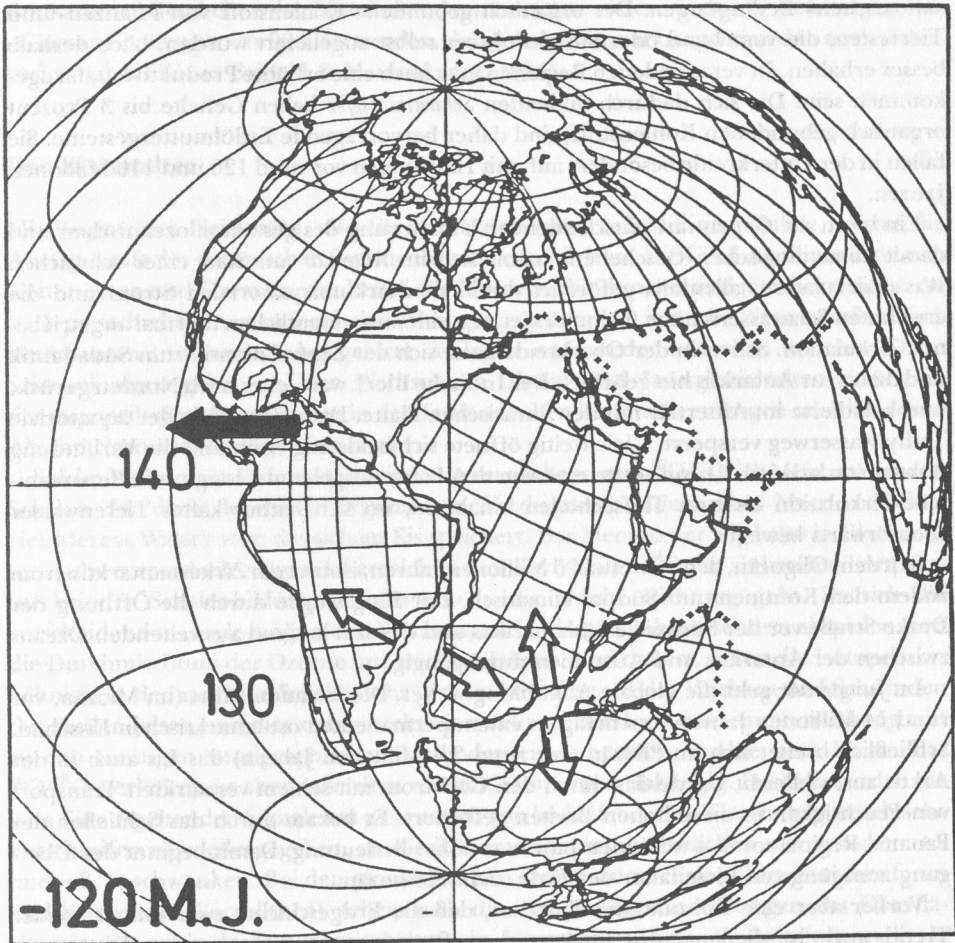


Abb. 9: Verbreitung der Ozeane und Kontinente vor 120 Millionen Jahren, in der Unterkreide-Zeit. Kurz danach öffnete sich der Südatlantik und trennte sich Südafrika von der Antarktis, die noch mit Indien zusammenhängt.

(Abb. 7 und 8 aus Mskr. Seibold, »Die Ozeane im zeitlichen Wandel«, Halle, Leopoldina 1980).

Ausgeglichenes Klima aber begünstigt in den Ozeanen Beruhigung des Austauschs von Wassermassen, begünstigt Stagnation, und damit die Abnahme des Sauerstoffmangels im Meerwasser. In den kreidezeitlichen Atlantik, Indik, zum Teil auch Pazifik und in die Tethys schoben sich zudem aus flachen Nebenmeeren schwerere, salzreiche Wassermassen ein, die dort durch Verdunstung gebildet wurden. Sie förderten durch ausgeprägte Sperrschichtung in offenen Ozeanen, aber auch in den zahlreichen Becken der sich bildenden passiven Kontinentalränder die Sauerstoffverarmung, führten zu sogenannten

»anoxischen« Bedingungen. Der organisch gebundene Kohlenstoff von Pflanzen- und Tierresten, die vom Land oder aus dem Meer selbst angeliefert wurden, blieb deshalb besser erhalten. In verschiedenen Regionen mag auch eine erhöhte Produktivität dazugekommen sein. Die sich dadurch bildenden *Schwarzschiefer* haben Gehalte bis 3 Prozent organisch gebundenen Kohlenstoff, sind daher hervorragende Erdölmuttergesteine. Sie fallen in der Unterkreide besonders auf, mit Häufungen vor rund 120 und 110 Millionen Jahren.

Ein bis in die Gegenwart entscheidender Umschwung des gesamten ozeanischen und damit klimatologischen Geschehens bahnt sich im *Alttertiär* an. Statt einer schwachen Wasserzirkulation, allenfalls gefördert durch den zirkumäquatorialen Strom und die erwähnten Salzwasserschübe, kommt es jetzt zu einer im wesentlichen thermal angetriebenen Zirkulation. Schon in der Oberkreide hatte sich der Zentralatlantik zum Südatlantik und damit zur Antarktis hin geöffnet. Der Indische Block war weiter nach Norden gerückt und kollidierte im Alttertiär mit der Eurasischen Platte. Dadurch wurde der äquatoriale Tethyswasserweg versperrt. Gleichzeitig öffnete sich beidseitig Grönland die Verbindung Arktis-Nordatlantik. Damit setzte eine von den Polen ausgehende, longitudinale, ozeanische Zirkulation bis zum Tiefseeboden hinab ein, wo sich seither kaltes Tiefenwasser äquatorwärts bewegt.

Seit dem Oligozän, d. h. vor etwa 25 Millionen Jahren, isoliert ein Zirkumantarktisstrom zudem den Kontinent am Südpol klimatisch. Der Ring wurde durch die Öffnung der Drake-Straße vor der Südspitze Südamerikas und des sich laufend ausweitenden Ozeans zwischen der Antarktis und Australien durchgängig.

Im *Jungtertiär* geht die globale Abkühlung weiter. Die Isolation führt (im Miozän, vor rund 14 Millionen Jahren) erstmalig zu einem permanenten ost-antarktischen Eisschild. Schließlich breitet sich im Pliozän (vor rund 2,4 Millionen Jahren) das Eis auch in der Arktis aus, vielleicht wurde das durch den Golfstrom mit seinem verstärkten Transport von Feuchtigkeit in diese hohen Breiten gefördert. Er bekam durch das Schließen der Panama-Region vor 3–4 Millionen Jahren erhöhte Bedeutung. Damit beginnt der Übergang zum jüngsten Eiszeitalter der Erde, dem Pleistozän.

Vorher aber eine Episode, die illustriert, daß die Erdgeschichte zwar immer wieder Trends aufweist, die lange durchhalten, aber oft unerwartet gestört werden. Die zunehmende globale Abkühlung im Tertiär ist unser Beispiel. (Zwischengeschaltete gegenläufige Phasen wurden hier ausgeklammert.) Durch oft nur lokale Ereignisse aber kann es zusätzlich zu regionalen oder gar globalen Auswirkungen in den Meeren kommen, die ja alle zusammenhängen. Wird dieser Zusammenhang gestört, so führt das zu Katastrophen wie am Ende des Miozäns, d. h. vor rund 5,5 Millionen Jahren im *Mittelmeer*. Dieses »Messinian Event« dauerte »nur« eine halbe Million Jahre. Durch tektonische Bewegungen hatte sich die Straße von Gibraltar geschlossen. Durch die auch schon damals hohen Verdunstungsraten sank der Meeresspiegel des Mittelmeeres ab. Dadurch wurden seine Ränder trockengelegt und subaerisch erodiert. Schließlich trocknete es praktisch ganz aus. Die Zuflüsse schnitten auf das schon damals mehr als 1 km tiefere Niveau steile Canyons ein, die eventuell sogar bis in die so tiefen oberitalienischen Seen zurückgriffen. Salz und Gipsschichten lagerten sich am Boden ab. Die Absenkung entzog dem Weltmeer über 1 Mio. km³ Salze, weshalb global der Salzgehalt des Meeres um rund 2 ‰ abnahm. Das

dramatische Geschehen im Mittelmeer konnte unter anderem durch Bohrungen der »Glomar Challenger« aufgeklärt werden, die globalen Auswirkungen werden noch untersucht (vgl. CITA, in Seibold & Meulenkamp, 1984).

Das Eiszeitalter

Mit Beginn des Pleistozäns, also für die letzten rund 2–3 Millionen Jahre, nimmt die Aussagekraft der ozeanischen Sedimente ganz erheblich zu. Die Groß-Konfiguration von Kontinenten und Ozeanen, das Relief, die Meeresverbindungen sind jetzt bekannt, wenn auch periodische Meeresspiegelschwankungen von über 100 m solche Wasserstraßen stark beeinflussen und weite Schelfgebiete freilegen und wieder bedecken konnten. Diese Schwankungen gehen auf den Wechsel von Glazial- und Interglazialzeiten zurück, in denen jeweils dem Meer Wasser in den festländischen Eisdecken entzogen oder bei deren Abschmelzen wieder zugeführt wird.

Solche Wechsel verändern auch die *Isotopenverhältnisse* von $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ im Meer und in den Schalen der darin lebenden Organismen. Verdunstung nimmt dem Meer vor allem »leichteres« Wasser weg, das sich im Eis speichert. Das Meerwasser wird also in Glazialzeiten »schwerer«. Außerdem reichert sich in den Karbonaten ^{18}O mit sinkender Temperatur bei der Schalenbildung an, was also in die gleiche Richtung geht. Da sich die entscheidenden Änderungen der Vereisungen in einigen Jahrtausenden abspielen und die Durchmischung der Ozeane nur etwa ein Jahrtausend dauert, geben die Isotopenverhältnisse in den marinen Schalen sehr genaue Hinweise auf das Wachsen und Schwinden des Festlandeises, und dies zudem weltweit synchron. Mit der Isotopenuntersuchung tritt zu den sonstigen stratigraphischen Methoden eine ungemein exakte neue hinzu. Das $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ -Verhältnis ist aber außerdem von der Temperatur abhängig. Deshalb werden die vom Eis ausgehenden Signale am genauesten von bodenlebenden Tieren (hier benthische Foraminiferen) wiedergegeben, da die Tiefenwässer im wesentlichen nur zwischen $+2$ und -2°C schwanken. Bei den planktonischen Organismenschalen (hier Foraminiferen und pflanzliche Coccolithen) gehen auch die Temperaturschwankungen des Oberflächenwassers mit in das Isotopenverhältnis ein. Umgekehrt: Dieses Verhältnis kann direkt Rückschlüsse auf Wassertemperaturen für die Abschnitte des Tertiärs geben, in denen es noch keine Festlandsvereisung gab. Eine ganze Reihe der vorstehend behandelten Verhältnisse (S. 396) ist mit derartigen Methoden aufgeklärt worden.

Die Rekonstruktion der Umwelt des Eiszeitalters hat zudem entscheidende Impulse durch die Verwendung quantitativer Techniken der mathematischen *Statistik* in der Mikropaläontologie erfahren, wonach beispielsweise die Oberflächenwassertemperaturen vor 18000 Jahren zum Höhepunkt der – vorerst – letzten Glazialzeit für das ganze Weltmeer rekonstruiert werden konnten. Der Golfstrom floß damals von Florida direkt nach Spanien und erwärmte die Küsten Europas nördlich davon nicht.

1955 schon hatte Emiliani auf 17 »Isotopenstadien« (Zeitabschnitte, die durch unterschiedliche $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ -Isotopenwerte der Foraminiferenschalen gekennzeichnet sind) für die letzten 425000 Jahre in Sedimentkernen aus der Karibik und dem Nordatlantik hingewiesen. 1976 wurden solche Stadien bis 1,8 Millionen Jahre zurückverfolgt, vor allem

durch Shackleton. Dabei hat sich auch gezeigt, daß normalerweise das Isotopenverhältnis auf Kaltzeiten hin langsam zunimmt, auf Warmzeiten hin aber in wenigen 1000 Jahren brutal abfällt.

Mit Einführung des Hydropistoncorers auf der »Glomar Challenger« gelang die Bergung ungestörter Kerne jungen Materials mit zum Teil mehreren 100 m Kernlänge. Sie werden laufend ausgewertet und versprechen noch viele Überraschungen, vor allem für das Tertiär. Immer mehr setzt sich zum Beispiel die Ansicht durch, daß sich in diesen Sedimenten unter Verwendung der Sauerstoff-Isotopen-Daten die sogenannten *Milankovitch-Zyklen* abbilden. Seit 1920 hatte dieser in seiner Strahlungskurve auf zyklische Änderungen der Erdbahn und -achse mit Perioden von 21 000 Jahren (= Präzession der Tag- und Nachtgleiche, Umlauf des Perihels), 40 000 Jahren (Neigung der Erdachse, Schiefe der Ekliptik) und 95 000 Jahren (Exzentrizität) für die letzten 600 000 Jahre (1938) hingewiesen. Diese Regelmäßigkeiten werden jetzt benutzt, die Lücken in der absoluten Datierung zwischen den ^{14}C -Daten, die nur einige wenige 10 000 Jahre zurückreichen, und dem ersten paläomagnetischen Umschlag (Brunhes-/Matuyama-Epoche) vor 730 000 Jahren zu schließen. Die Schwankungen der Exzentrizität bewirken freilich nur eine Änderung der Sonneneinstrahlung um weniger als 0,1 Prozent, und es ist derzeit trotz verschiedenster Modellrechnungen noch nicht klar, welche Verstärkereffekte trotzdem zu Glazialzeiten führen mögen. 21 000-Jahreszyklen werden übrigens auch in älteren Sedimenten mit wahrscheinlichen Jahreslagen vermutet, so in den Greenriver Ölschiefern im Eozän Nordamerikas und in verschiedenen kreidezeitlichen Tiefwasserkalken.

Die zeitliche Auflösung geht in den jüngeren Tiefseesedimenten – bei hohen Sedimentationsraten und geringer Bioturbation, d. h. Durchwühlung der Schichten durch Bodenbewohner – teilweise in Genauigkeiten von weniger als einem Jahrtausend. Das liefert neue Möglichkeiten auch für Paläontologen, die die *Ausbreitung* und die *Evolution* von *Organismen* untersuchen. Die ozeanische Stratigraphie ist damit der »Landstratigraphie« in den jüngsten Abschnitten der Erdgeschichte methodisch und nach den Ergebnissen weit vorausgeeilt, und es gilt, in den nächsten Jahrzehnten viele Brücken zwischen beiden Bereichen zu schlagen (vgl. Seibold & Meulenkamp, 1984).

Der Höhepunkt der letzten Vereisung wurde vor 18 000 Jahren erreicht, doch verlief die Klimaverbesserung bis heute nicht gleichmäßig. Ein Optimum wurde vor rund 6000 Jahren (8000–4000 Jahre) erreicht, bei dem die globalen Durchschnittstemperaturen seit dem Eis-Höchststand um etwa 6 °C gestiegen sein sollen. Doch wieder sind solche globalen Zahlen wenig aussagekräftig: Im zentralen subtropischen Atlantik erwärmte sich das Wasser um weniger als 2 °C, im Nordatlantik um 10–15 °C. Derzeit laufen weltweit Untersuchungen, um in Zeitabschnitten von 3000 Jahren auch kontinentale Klimazeugen einzuarbeiten, d. h. vor allem Pollenspektren und, als Regenmesser, Wasserstände von Seen. Alle Ergebnisse werden mit Klimamodellen verglichen. Der Beginn der Holozäns, in dem wir leben, wurde auf 10 000 Jahre vor heute festgelegt.

Ozeane und Kontinente: offene Fragen zur Plattentektonik

Konvektionsströme im Mantel

Man kann die Erde als Wärmemaschine ansehen, die durch radioaktiven Zerfall instabiler Isotope von innen erwärmt wird. Die Wärmeabgabe wird durch die erwähnten Konvektionsströme im Erdmantel erleichtert. Die Abkühlung von außen führt zu einer kälteren, daher schwereren und starren Außenhaut, der Lithosphäre, über einer wärmeren, leichteren, beweglicheren Unterlage, der Asthenosphäre. Die Grenze, im Durchschnitt 100 km tief, wird teilweise durch eine Lage mit reduzierter seismischer Wellengeschwindigkeit markiert. Unter Ozeanen werden vielfach – 45 km, unter Kontinenten – rund 150 km angegeben. Die Lithosphäre will absinken, weicht aber durch die Konvektionsströme seitlich aus, vielleicht auch nur durch das Gefälle von den mittelozeanischen Rücken zu den Subduktionszonen, in denen sie schließlich – offensichtlich sich dabei sehr langsam erwärmend – abtaucht. Im Mantel strömt danach abgetauchtes Material wieder, stark verändert, zu den Regionen zurück, wo sich Platten trennen, und steigt wieder auf. So weit, so gut, vor allem für den völlig spekulativen unteren Rückstrom.

Wie sind aber diese Vorstellungen zu beweisen? Bis vor wenigen Jahren wußte man vom *Erdmantel* recht wenig, obwohl er das Hauptreservoir für Stoff und Energie der Erde ist. Er macht 84 Prozent ihres Volumens und 68 Prozent ihrer Masse aus. Soeben werden aber erste Ergebnisse einer rechnergestützten Geo-Tomographie des Erdinnern bekannt (Anderson & Dziewonski, 1984, Scientific American), bei der seismische Wellen ausgenutzt werden, um Inhomogenitäten im Mantel zu orten. Der Vergleich mit der medizinischen Computertomographie liegt daher nahe. Das Wesentliche: Gesteine werden im elastischen Bereich verformt durch Kompression oder durch Scherung. Kaltes, daher rigideres Material widersetzt sich dem Scherstreß, aber auch der Kompression. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit beider seismischer Wellenarten nimmt darin daher zu, in wärmeren Bereichen also ab. Die Geschwindigkeiten hängen auch von der Orientierung der Minerale ab, die sich bei Fließbewegungen einregeln. Damit erschließt man sich die Richtung von Strömen im Mantel. Nach den ersten Karten des Mantels bis etwa 670 km hinab sieht es tatsächlich so aus, daß unter den mittelozeanischen Rücken wärmeres, unter den Tiefseegesenken kälteres Material liegt – ganz nach den Vorstellungen der Plattentektonik. Freilich ist das anscheinend nicht überall so. Außerdem wechseln die Bilder zum Beispiel in 100 – 250 – 350 km Tiefe, was als Hinweis auf laterale Material-Zufuhren aufgefaßt wird. Solche Strömungen scheinen aber nicht in einer – vertikalen – Ebene zu liegen, wie es unsere Schemata und Modellrechnungen bisher annehmen. Die Wurzeln der sogenannten Hot Spots, auf die noch eingegangen werden soll, scheinen dagegen tatsächlich bis in den Unteren Mantel hinunterzureichen, etwa unter Island oder Hawäii (Abb. 2). Unter den alten Kontinental-Schilden aber herrschen kältere Mantelbereiche vor. Manches spricht außerdem dafür, daß es nicht, wie gelegentlich angenommen, zwei Konvektionsstockwerke gibt. – Übrigens hat schon der Alpengeologe O. Ampferer (1906) als Gegner der damals vorherrschenden Schrumpfungstheorie der Erde an Unterströmungen gedacht!

Die Verfeinerung der Methoden, der geplante Einsatz geeigneter Geräte in einem

weltweiten Netz, die Kombination mit anderen geophysikalischen Weltkarten, etwa der Schwereverteilung, wird eine Fülle neuer Erkenntnisse, auch für die Plattentektonik, bringen.

Die Auswertung der magnetischen Streifenmuster und der Erdbeben halfen, Angaben zur *Geschwindigkeit* und auch zur *Richtung der Plattenbewegungen* zu machen, wie sie in Abb. 2 eingetragen sind. Jetzt kommt die Möglichkeit in Sicht, beides mit dem SLR-System (Satellite Laser Ranging) direkt zu messen.

Es werden dabei Laserimpulse auf Reflektoren (auf Satelliten oder den Mond) geschickt, dort reflektiert und an Erdstationen empfangen. Aus den gemessenen Zeiten werden die Entfernungen bestimmt – mit Fehlern um 5 cm bei einer Basislinie von rund 4000 km. Man kann auch Laserstrahlen von Satelliten auf Reflektoren auf der Erde schicken. Derzeit gibt es 17 feste Laserstationen auf den wichtigsten Platten und einige zusätzliche bewegliche. Bei dieser VLBI (Very Long Baseline Interferometry) ist die Genauigkeit derzeit etwa doppelt so gut wie bei SLR. Nach den bisherigen – nur dreijährigen – Auswertungen entfernt sich Nordamerika von Europa derzeit um 1,3 cm/Jahr. Im Pazifik wurden Geschwindigkeiten um 4–6 cm/Jahr gemessen, freilich bei jeweiligen Fehlermöglichkeiten von 1–4 cm. Im ganzen aber entspricht dies bisher den Vorstellungen der Abb. 2. Umgekehrt weist alles nach fast zehnjährigen Messungen über die USA hinweg, von Westford in Massachusetts nach Owens Valley in Kalifornien, auf Entfernungskonstanz, also auf eine völlig rigide Platte hin.

Vor 30 Jahren bestimmten Geodäten interkontinentale Distanzen mit astronomischen Methoden auf einige 100 m genau. Heute sind es mit den neuen Methoden einige cm. Es lohnt sich daher in doppelter Hinsicht, weitere 30 Jahre zu warten.

Freilich bleibt auch damit eine ganz wichtige Frage ungelöst: Erfolgte das Auseinanderdriften der Platten in der Erdgeschichte kontinuierlich oder nicht? Und war die Beschleunigung bzw. Verlangsamung eventuell sogar an allen Divergenzrändern synchron? Es wurde schon gezeigt, daß Beschleunigung zu einem Meeresspiegelanstieg führen mußte und umgekehrt. Würden dadurch auch tektonische Vorgänge, etwa gebirgsbildende, sog. orogene Phasen beeinflußt? Stimmt es, daß bei Platten mit langen Subduktionsrändern, etwa der pazifischen oder indischen, Geschwindigkeiten um 8 cm/Jahr erreicht werden, bei den anderen, mit den großen kontinentalen Anteilen, also Nord- und Südamerika, Eurasien, Afrika, Antarktika, nur um 2 cm/Jahr? Wie, wann und warum hat sich vielfach die Driftrichtung geändert, wie sie am »Ellbogen« (S. 404) in der Tiefseeberge-Kette westlich Hawaii abzulesen ist? Viel genauer können natürlich Vertikalbewegungen gemessen werden. Glazial-isostatische Hebung nach Abschmelzen der kontinentalen Eisschilde kann weithin einige cm/Jahr betragen. In den heute aktiven Gebirgsgürteln können gleichfalls vertikale – aber auch horizontale – Beträge von einigen cm/Jahr erreicht werden. Plattformen der Kontinente, wie weite Teile Rußlands, heben und senken sich dagegen derzeit im allgemeinen nur um Bruchteile von mm/Jahr. In der Westeifel wird freilich gegenwärtig 1 mm/Jahr Heraushebung erreicht.

Welche Rolle spielen die sogenannten »Terranes« [sprich te'reins] beim Wachsen der Kontinente in diesen Zonen (Ben-Avraham et al, 1981, Science)? Sie werden bei der Subduktion als Schollen mit Dimensionen bis einige 100 km Länge angegliedert und haben nach paläomagnetischen Messungen und Faunenhinweisen angeblich Reisen von bisweilen mehr als 2000 km hinter sich. Spezialisten zählen gegenwärtig über 300 solcher Terranes um den Pazifikrand herum. Woher kommen sie? 10 Prozent der heutigen Ozeanböden ragen einige 1000 m vom Tiefseeboden auf. Einige dieser Plateaus erreichen gar den Meeresspiegel. Sie haben sehr unterschiedlichen Bau – von Vulkanbauten bis zu Sockeln mit granitischen Gesteinen. Wenn diese Gebilde subduziert werden sollen, scheint dies nicht bei allen zu gelingen. Man wird sehen müssen, wie viele solcher exotischer Terranes auch wissenschaftlich überleben werden.

Ein letztes Problem bei diesen konvergenten Plattenrändern sind die sogenannten *Back-arc-basins*, die Meeresbecken hinter den Inselbögen (Abb. 3), wie das Ochotskische und Japanische Meer und die Becken hinter den Philippinen. Die weithin verbreitete Meinung ist, daß sich in ihnen ein divergierender Rücken entwickelt hat, der sich dann in der Art der Abb. 5 zu einem Mini-Ozean ausweitete.

An den Subduktionszonen setzt besonders heftig die vielfach geäußerte Kritik von Belousov an, der die Plattentektonik insgesamt ablehnt. Er glaubt, daß diese Zonen auf Störflächen zurückgehen, die tief in den Mantel reichen, so daß an ihnen Gase, Lösungen und basische und ultrabasische Magmen aufsteigen können. Durch Druckentlastung sollen Teile davon flüssig werden, so daß Krustenblöcke darüber einsinken und schließlich eingeschmolzen werden. Diese Absenkung beeinflusse den Plattenrand, aber auch die Hinterbogen-Becken. Wesentliche Tiefseebereiche könnten danach durch »Ozeanisierung« von kontinentaler Kruste entstehen. Die genannten Becken machen immerhin 10 Prozent der ozeanischen Lithosphärenfläche aus.

Die Kenntnis der *Divergenzränder*, an denen neue ozeanische Kruste gebildet wird, hat in den letzten Jahren die größten Fortschritte gemacht. Die zentralen Riftzonen mit ihren Gräben sind morphologisch und petrologisch mit flächendeckenden Echographen wie Seabeam oder Side Scan, mit Unterwasserfotografien aus Schleppkörpern oder Tauchbooten, zum Beispiel der französischen »Cyana«, der amerikanischen »Alvin« und mit verschiedensten Probennehmern untersucht worden. Dazu kamen Bohrungen. Im Januar 1983 gelang es der »Glomar Challenger« auf der Flanke des Costa Rica-Rückens in 3460 m Wassertiefe und unter 274 m Sedimenten sogar 1075 m in die ozeanische Kruste einzudringen.

Die zentralen Rücken ragen in 95 Prozent ihrer Erstreckung von 60000 km bis in Wassertiefen von 2500–2900 m auf. Warum so einheitlich? Wahrscheinlich »kommuniziert« dabei eine »flüssige« Asthenosphäre. Ein tiefer, einige Kilometer breiter Graben bildet die Symmetrieachse auf langsam auseinanderdriftenden Rücken, etwa im Atlantik (Abb. 1). Er zeigt vulkanische Ergüsse, Spalten und Brüche und wird beidseitig durch stark zerhackte Streifen begleitet. Die Basalte erstarren bei der Abkühlung von 1200 °C auf 2 °C als Kissenlaven. Nach Bohrungen können diese einige 100 m mächtig werden. Sie sind in den obersten 100 m sehr porös. Darunter kommen Gangfüllungen, die zuletzt das ganze Gestein ausmachen. Ähnliche Abfolgen zeigen die erwähnten *Ophiolite*, wie sie auf Zypern, in Oman oder in der Ivrea-Zone der Südalpen zutage treten. Dort setzt sich die Folge nach unten durch Gabbros bis an den Erdmantel fort, der mit Periodotiten beginnt. Es kann hier, wie im gesamten Beitrag, nicht näher auf petrologische Einzelheiten, etwa die verschiedenen Basalttypen, eingegangen werden. Für die Masse der global neu gebildeten Ozeankruste gibt es verschiedene Abschätzungen, zwischen 2–3 und 10–20 km³ Basalt pro Jahr. Nimmt man für das Gesamtvolumen die Ozeankruste 2–3 × 10⁹ km³ an, so würde im letzteren Fall diese gesamte ozeanische Kruste in 100–200 Millionen Jahren erneuert werden. Nicht schlecht für unsere globalen Hypothesen, aber doch noch alles so ungenau wie das mit 300 km³, also einer Größenordnung höher geschätzte subduzierte Volumen (S. 401).

Schnell auseinanderdriftende Rücken, etwa der ostpazifische, haben keine zentralen Gräben, erbrachten dafür aber seit 1977 mit den heißen Quellen wahrhaft sensationelle

geologische und biologische Entdeckungen. Auf dem Galapagos-Rücken (in Äquatornähe, s. Abb. 2, vgl. Corliss et al., Science 1979), aber auch auf dem Haupt Rücken etwa auf 13 oder 21 °N stieß man auf Verfärbungen durch massive Fe-, Cu- und Zn-Sulfide. Man fand auch kaminartige Bildungen, denen »hydrothermale« Wässer mit solchen Sulfidflocken und Temperaturen bis über 350 °C entwichen – ein handfestes Modell für die Entstehung mancher Erzlagerstätten: Ozeanwasser dringt tief in die Spalten und Hohlräume der Basalte ein, wird in der Tiefe aufgeheizt und tritt wieder aus dem Meeresboden aus. Damit entnimmt es dem Meerwasser Na, Mg, CO₂, S und O. Umgekehrt führt es ihm nach Reaktionen mit der ozeanischen Kruste Si, Ca, Fe, Sr oder Mn zu. Jährlich sollen dabei 5×10^7 t Mg aus dem Meerwasser verbraucht und ihm über 30×10^7 t Si und Ca, über 10^7 t Fe zugeführt werden (Wedepohl 1984). Damit wird bei manchen Elementen die jährliche Flußzufuhr ins Meer übertroffen. Schätzt man den Wasseraustausch selbst ab, so müßte jeder Wassertropfen der Ozeane in einigen Millionen Jahren diese Kruste passieren. Das Meerwasser wird dadurch also auch gepuffert.

So aufregend diese neuen Aspekte für den Geologen, ganz allgemein für Hydrothermal-Lagerstätten oder die Geochemie der Ozeane sind, so sehr verblissen sie gegen die Überraschungen für den Biologen. Um die Quellen in über 2000 m Meerestiefe herum wurden bisher unbekannte, meterlange Röhrenwürmer, dezimetergroße Muscheln und andere Tiere gefunden. Sie müssen in dieser lichtlosen Umgebung auf Bakterien als Nahrung angewiesen sein, die Chemosynthese, nicht Photosynthese betreiben.

Kontinentalränder

Einige Probleme der konvergierenden Plattenränder sind schon behandelt worden. Ein Typ davon ist gleichzeitig ein – aktiver – Kontinentalrand, etwa die Westküste Südamerikas. Die passiven Kontinentalränder liegen dagegen innerhalb einer Platte, da das Auseinanderdriften des Ozeanbodens die kontinentale Kruste vom Plattenrand in der Art der Abb. 5 entfernt hat. Die hauptsächlichsten ungelösten Probleme der passiven Kontinentalränder sind der Bau des tieferen Untergrunds, die Verhältnisse in der Grenzregion ozeanische/kontinentale Kruste (Abb. 4) und die Ursachen für ihr allmähliches Absinken um 12–15 km. Die derzeitigen seismischen Verfahren lösen die Details der Strukturen in solchen Gesteinstiefen noch nicht genügend auf. Eine Antwort auf diese Fragen wäre ungemein wichtig für die weitere Exploration auf Kohlenwasserstoffe, für die die passiven Kontinentalränder eine der wichtigsten Zukunftschancen bieten (S. 417).

Was bedeuten aber beide Typen von Kontinentalrändern für die Geologie der Kontinente selbst? Sie sind heutige Beispiele für eine der strukturellen Großformen der Geologie, der *Geosynklinalen*. Diese sind zum Teil über 1000 km lange und einige 100 km breite Gürtel, die langsam absinken und dabei bis über 10 km Sedimente aufnehmen können. Oft genug beginnt damit eine Periode maximaler Deformation, etwa der Faltung und schließlich der Orogenese, der »Gebirgsbildung« bis zur Heraushebung zu morphologischen Gebirgszügen. Man unterscheidet bei den typischen Geosynklinalen zwei freilich nicht scharf zu trennende Haupttypen, die sogenannten Eu- und die Mio-Geosynklinalen. Die Eu-Geosynklinalen haben anfänglich eine ausgesprochene Permeabilität für von

unten eindringende basische und ultrabasische Magmen («Initialer Magmatismus»). In der Folge dringen saure Granite u. ä. auf. Starke Gesteinsmetamorphose und Deckentektonik gehören zu diesem Typ. Es liegt daher nahe, die pazifischen Kontinentalränder als heute aktive Eu-Geosynklinalen anzusehen und durch Vergleich mit fossilen Fällen, etwa den ersten Stadien der Entwicklung der Westalpen, für beide Bereiche noch viel zu lernen.

Bei den Mio-Geosynklinalen tritt der Vulkanismus fast völlig zurück, und es kommt allenfalls zu mäßiger Gesteinsmetamorphose. Vielfach werden fast durchgehend Flachwassersedimente, etwa Kalke, abgelagert. Die Deformation ist geringer, kann aber trotzdem bis zur Deckenbildung führen. Der kalkreiche Nordrand der Alpen und die Ostalpen ganz allgemein (Helvet) haben solche Züge. Hier gibt es Ähnlichkeiten mit den passiven Kontinentalrändern, doch herrscht dort heute Zerrungstektonik vor. Wie und wann käme es eventuell auch an passiven Rändern zur Einengung, die Falten und Überschiebungen erzeugen kann?

Intraplattenstrukturen

Zwar häufen sich tektonische und vulkanische Aktivitäten an den Rändern der Platten, doch ist auch deren Inneres nicht tot. Wie gezeigt, wird die ozeanische Kruste beim Altern kälter und sinkt dadurch nach einfachen Regeln ein. Mit ihr sinken die Vulkanbauten tiefer. Sie ragten in manchen Fällen ursprünglich als Inseln über den Meeresspiegel auf und wurden durch Wellenerosion zu Kegelstümpfen, den sogenannten Guyots gekappt. In deren Flachwasser konnten Korallenriffe aufwachsen. Findet man solche Guyots und Riffe in größerer Wassertiefe, so ist dies heute durch das »Sea floor spreading« leicht zu erklären. Vor drei Jahrzehnten war es ein Gegenstand vieler Spekulationen.

Trotzdem gibt es Vulkaninseln auch auf alter ozeanischer Kruste, etwa die Hawaii-Gruppe oder die Kap Verde Inseln. Man erklärt dies durch Aufquellungen aus dem Mantel (Hot Spots, Aufschmelzgebiete bis zu einigen 100 km Durchmesser). Sie sollen ortsfest bleiben, auch wenn die Lithosphärenplatten darüber wegwandern. Ein klassisches Beispiel ist die Inselkette von Hawaii nach Westnordwest und dann in einem »Ellbogen« die Reihe der Emperor-Tiefseeberge nach Nordnordwest. Während der Vulkanismus auf Hawaii noch heute aktiv ist, wird das Alter der vulkanischen Gesteine nach Nordwesten allmählich immer größer, zuletzt bis 60 Millionen Jahre, also in der Richtung, in der die Pazifische Platte gewandert ist und dabei die Vulkanbauten an der Oberfläche mittransportiert hat.

Es gibt solche Hot Spots auch auf kontinentaler Kruste, wobei das Yellowstone-Gebiet und die Eifel mit dem in beiden Fällen so jungen Vulkanismus diskutiert werden (Morgan seit 1968). Im Yellowstone-Gebiet ist ein junger Magmenkörper nach seismischen Hinweisen bis in 300 km Tiefe nachzuweisen. In der Eifel – wie im gesamten Rheinischen Massiv – geht die derzeitige Hebung auf Dichteänderungen zwischen Unterkruste und Asthenosphäre zurück. Dabei spielen Aufschmelzung und flüchtige Bestandteile des Magmas in der Eifel eine wichtige Rolle.

Sind diese Hot Spots nun zufällige Erscheinungen, oder gehören sie als fundamentale Komponenten der Wärmeabgabe zur Mantelkonvektion? Beginnen mit ihnen die Rifts? Sind sie mit Hochgebieten des Geoids in Verbindung zu bringen?

Was geschah vor der Permzeit?

Unser Ausgangspunkt war die Pangaea, der in der Permzeit noch intakte Großkontinent (Abb. 8). Er zerbrach in der Folgezeit. Einzelkontinente bildeten sich. Sie wurden mit verschiedenartigsten Rändern zu den neuen und alten Ozeanen hin ausgestattet. Was geschah vorher? Es wird natürlich derzeit viel darüber nachgedacht, und die Vorstellungen der Plattentektonik werden bis weit in das Präkambrium zurück angewandt. Zumeist ist man dabei noch auf indirekte Ableitungen angewiesen. Außerdem muß immer wieder angenommen werden, daß ein und dasselbe Gebiet auseinanderdriftete, einen – oft recht kleinen – Ozean bildete, danach wieder zusammengeschoben werden konnte, seine Kruste also verschluckt wurde, und der Ozean verschwand. Der Atlantik soll zum Beispiel schon einmal im Paläozoikum bestanden haben.

Zu den wenigen direkten Spuren einer früheren Kollision bzw. Subduktion zählen die erwähnten *Ophiolite*. Sie sind Reste ozeanischer Kruste, als tektonische Späne in den Gebirgsketten des Festlands bewahrt, freilich meist nur in ungemein gestörten, komplexen »Suturzonen« aufgeschlossen. Das Troodos-Massiv auf Zypern gehört beispielsweise dazu, mit seinen schon in der Antike bekannten Kupferminen. Und das wäre schon ein Beispiel für die Bildung von Erzlagerstätten nach dem Modell der submarinen heißen Quellen. Die Tethys soll sich im Alpenraum in der Trias von Osten her geöffnet, in der Kreide- und Tertiärzeit wieder teilweise geschlossen haben. Dabei fielen, in mehreren Suturen, solche ophiolitische Späne ab, »verlorene Ozeane in den Gebirgsketten« (Auboin).

Schließlich: Es ist eine alte Erkenntnis, in der tektonischen Geologie vor allem von Stille (1876–1967) vertreten, daß im Laufe der Erdgeschichte die Kontinente von den erwähnten alten Schilden aus lateral gewachsen sind. An ein Ureuropa, den Fenno-Sarmatischen Kern, legte sich ein mobiler Geosynklinalraum, der in der kaledonischen Orogenese (vor rund 520–400 Millionen Jahren) zu einem Paläo-Europa versteifte. Ein weiterer Anwachsstreifen wurde durch die variszische Orogenese (vor rund 350–200 Millionen Jahren) Meso-Europa, das von Spanien bis in den Ural nachzuweisen ist. In der Gegenwart sind wir Zeugen einer fortschreitenden Konsolidierung Neo-Europas (seit rund 180 Millionen Jahren), das die mediterranen Gebirgszüge zwischen Gibraltar und der Türkei einschließlich der Alpen und Karpaten/Balkan umfaßt. Da in den Geosynklinalen marine Schichten abgelagert worden sind, mußten wiederholt eine Fülle von Kontinentalrändern vorhanden gewesen sein, deren Spuren in den Resten der alten Geosynklinalen aufgespürt werden. Einige Kriterien für diese Suche wurden auf S. 404 gegeben.

Leider, da sehr komplizierend, muß davon ausgegangen werden, daß auch durch eine Orogenese starr gewordene Krustenstücke remobilisiert werden können. Das erschwert die Entzifferung dieser Spuren zusätzlich. Ähnlich schwierig dürfte der strikte Nachweis angenommener Periodizitäten der genannten Höhepunkte tektonischer Aktivität von rund 200 Millionen Jahren sein. (Ende variszisch vor 200 Millionen Jahren, kaledonisch vor 400, panafrikanisch vor 600, brasilianisch vor 1000 Millionen Jahren.) Und schließlich wissen wir noch nicht, warum die Revolution im Erdgeschehen im Perm angelegt wurde. Hat die einheitliche Pangaea mit ihrer dicken kontinentalen Kruste als Isolierschicht, als Stau für den Wärmestrom aus dem Mantel gewirkt, bis aufsteigende Konvektionsströme schließlich zur Riftbildung und damit zum Zerfall führten?

Noch viel offener sind die noch prinzipielleren Fragen nach dem ersten Entstehen einer kontinentalen Kruste überhaupt. Wie kam es darin zur relativen Anreicherung von O, Si, Al, Alkalien und Erdalkalien, wodurch sie leichter als die ozeanische Kruste wurde ($d = 2,8$ gegen $d = 3,0$)? War die kontinentale Kruste ursprünglich eine dünne, allumspannende Haut? Oder waren es primär mehrere Kontinente, oder nur einer? blieb diese Masse des Kontinents oder der Kontinente in der Erdgeschichte einigermaßen konstant, trotz des Anwachsens der alten Schilde? Kontinente verloren durch Abtragung immer Material in die Ozeane. Wie kam es dann aber wieder zurück? Durch Eingliedern subduzierten Materials oder der Terranes?

Dies führt uns zu weiteren Problemen der kontinentalen Kruste.

Kontinentale Kruste

Wir haben bisher vorwiegend vom Ozean auf die Kontinente geblickt, obwohl die marinen Geowissenschaften so jung sind. Noch immer dürfte allein unsere Kenntnis der detaillierten Morphologie der Ozeanböden so lückenhaft sein wie die Kenntnis des Innern der Kontinente vor zwei Jahrhunderten. In beiden Fällen war bzw. ist sie im wesentlichen auf Routen bzw. auf Profile von Schiffsexpeditionen beschränkt.

Ähnliches gilt für den flacheren Untergrund. Trotz mancher noch bestehender Lücken in der geologischen Kartierung der Kontinente sind doch weite Gebiete gut bekannt, und dies zum Teil seit einem Jahrhundert. Die ganze Sowjetunion ist beispielsweise jetzt im Maßstab 1:200 000 geologisch kartiert. Das Königreich Sachsen war es, pionierhaft, im Maßstab 1:25 000 schon im Jahre 1895. Die Aufnahmen gehen aber überall auch heute noch weiter. Teilweise, weil neue Methoden zur Verfügung stehen, um die Oberfläche, tektonische Störungen usw. in weiten und zum Teil schwer zugänglichen Regionen rasch zu erfassen, etwa vom Flugzeug oder von Satelliten aus. Dünne Deckschichten von Gletscher-, Wüsten-, Flußablagerungen u. ä. können jetzt oft mit elektrischen, gravimetrischen oder magnetischen Methoden von der Luft oder vom Boden aus durchdrungen werden. Flache Bohrungen ergänzen dann diese Flächenaufnahmen punktuell.

Ein weiterer Grund für *wiederholte Kartierungen* liegt darin, daß auf einer geologischen Karte zunächst Daten gesammelt werden. Sie müssen aber gedeutet werden, allein schon, um Lücken durch Extrapolation füllen zu können, mehr aber noch, damit zu den drei Raum-Dimensionen von Karte und Profilen die vierte hinzugebracht werden kann, die Zeit, d. h. der Ablauf der Erdgeschichte auf dem Kartenblatt. Und hier beginnt der wesentliche Unterschied zwischen Meeres- und Landgeologie.

Wie gezeigt, sind die Ozeanböden kaum 200 Millionen Jahre alt. Das älteste festländische Gestein wurde vor kurzem auf 3,8 Milliarden Jahre datiert! Schon deshalb muß die Geologie der Kontinente komplizierter sein. Viel länger und unter viel mannigfaltigeren Bedingungen wurden diese von oben abgetragen, von unten durch unterschiedlichste Magmen durchdrungen, durch Orogenesen tiefgreifend verformt, herausgehoben und abgesenkt.

Zu den verformten Geosynklinalen (S. 405) kommen als kontinentale Strukturelemente die *Plattformen*, zum Teil auch Kratone oder Blöcke genannt. In den alten Schilden

Skandinaviens, Nordamerikas, Afrikas, Australiens sehr weitflächig, in anderen Gebieten auch kleinflächig tritt der Kern der Sache, der Untergrund solcher Plattformen, zutage. Es handelt sich um Gesteine, die zumeist ein uraltes Geosynklinalstadium oder gar mehrere durchlaufen haben. Die Gesteine sind daher meist stark verformt und umgewandelt, bis hin zu Gneisen. Dieser Sockel kann durch später aufgelagerte, erhalten gebliebene Sedimente bedeckt sein. Sie liegen in stets eindrucksvollem Kontrast ohne Spuren einer Metamorphose mehr oder weniger horizontal darüber, sind allenfalls durch Brüche oder sanfte, großzügige Auf- oder Einwölbungen gestört. Ein wohlbekanntes Beispiel ist im Gran Canyon in den USA aufgeschlossen. Mäßige Hebung und Senkung beherrschen daher das Bewegungsbild. Die Sedimente wurden dementsprechend meist im Flachwasser abgelagert. Kalke sind deshalb verbreitet. Alles zeigt relative tektonische Ruhe an. Es ist noch nicht klar, worauf die dennoch vorhandenen Vertikalbewegungen letztlich zurückgehen.

An den *Rändern* kann man sich vorstellen, daß etwa bei der Kollision von kontinentaler Kruste wie im Himalaya diese sich verdickt und daher aufsteigt, da sie leichter als die Unterlage ist. Bei diesem Fall wird sogar diskutiert, ob nicht auch unter Umständen kontinentale Kruste subduziert werden könnte. Im Tibet-Plateau, 1,7 km² groß und rund 5 km hoch, beträgt die Krustendicke ja 70 km. In den Westalpen wurden zudem Gesteine der kontinentalen Kruste bekannt, die Coesit, die Hochdruckform von Quarz, enthalten. Um dies zu erklären, muß man annehmen, daß ursprüngliche Sedimente während einer Kontinent/Kontinent-Kollision auf 90 km oder mehr Tiefe versenkt und dann wieder tektonisch herausgehoben wurden (Chopin 1984, Contr. Min. Petrol.). Die randlichen Plattformgebiete werden dadurch beeinflusst. Ausdünnung der kontinentalen Kruste hingegen, wie sie an passiven Kontinentalrändern angenommen wird, führt zur Absenkung.

Was aber im Innern der Plattformen? Ist auch hier an – episodische? – »Ozeanisierung«, d. h. zunehmende Umwandlung der kontinentalen Kruste durch Zufuhr basischer Magmen von unten her, zu denken? All diese Komplikationen erlauben es daher im Vergleich zur ozeanischen Kruste viel weniger, von *einer* wohlbekannten Stelle aus zu extrapolieren. Bei den jungen und nach einheitlichem Prinzip geformten Ozeanböden, die zudem durch die Wassersäule gegen viele Umwelteinflüsse gepuffert werden, genügt *eine* überlegt angesetzte Bohrung, um manchmal auf Hunderte von Kilometern hin die seismischen Profile strukturell, sedimentologisch, ja altersmäßig deuten zu können. Der Erfolg des Deep Sea Drilling Projects zeigt dies. Die Dichte des bisherigen Bohrnetzes entspricht dabei etwa einer Bohrung auf der Fläche Frankreichs. Niemand würde es wagen, daraus die Geologie dieses Landes abzuleiten. Die raschen Fortschritte der marinen Geowissenschaften in den letzten Jahrzehnten sind auch aus diesen einfacheren Verhältnissen zu erklären. Zudem stellte die Geophysik die erwähnten neuen Bordinstrumente zur Verfügung.

Im Prinzip sollen diese und neu entwickelte Methoden jetzt auch vermehrt an Land eingesetzt werden, um auch die *kontinentale Lithosphäre* untersuchen zu können. Die seismische Tomographie wurde schon besprochen. Die Tiefentellurik erhält Aufschlüsse aus der elektrischen Leitfähigkeit der Gesteine. Die Satellitengeodäsie verfeinert die Kenntnis der Geoidfläche. Besonders eindrucksvoll sind gegenwärtig die Ergebnisse

kontinuierlicher Reflexionsseismik neben der Refraktionsseismik auch an Land. Das COCORP (Consortium for Continental Reflection Profiling) benutzt in den USA beispielsweise 5 auf schweren Fahrzeugen montierte Vibratoren, um den Untergrund mit Frequenzen zwischen 8 und 32 Hz zu erschüttern und das Ergebnis mit einem dichten Netz von Geophonen zu registrieren. Dadurch wird eine vertikale Auflösung der Strukturen um 50 m im oberflächennahen Untergrund, eine horizontale von einigen Zehnern von Metern, von 1–2 km in der Nähe der Moho erreicht. Ähnlich geht man zur Zeit in Frankreich und Deutschland vor. Um Großbritannien herum kommt man mit der »tiefen Seergeophysik« aus. Die Sowjetunion ist mit einem Netz von tiefseismischen Profilen überzogen. Dabei werden seit 1971 als Energiequellen auch unterirdische Nuklearexplosionen verwandt, so daß mit Abständen bis 500 km gearbeitet werden kann, ein großer Vorzug etwa im schwer zugänglichen Sibirien. Strukturen bis in über 200 km Tiefe konnten dabei entdeckt werden, also auch im Oberen Erdmantel.

Die bisherigen weltweiten, ganz allgemeinen Ergebnisse und einige der vielen noch offenen Fragen: Eine Fülle von subhorizontalen Reflektoren, die auf eine Wechsellagerung von Lamellen mit hohen und niedrigen seismischen Geschwindigkeiten hinweisen, vor allem in der unteren kontinentalen Kruste. Sie verblassen aber in Nähe der Moho (Abb. 10). Steile Verwerfungen, die nach unten aussterben. Anzeichen von Zerrung wie von Einengung, etwa eine flache Überschiebung mit über 200 km Transportweiten, die die Südpalachen erfaßt hat, so daß jetzt unter ihnen nach Erdgas gesucht werden kann. Oft werden alt angelegte Transportbahnen, etwa derartige Überschiebungen, bei späterer Verformung wieder benutzt, etwa bei der mechanisch noch rätselhaften Zerrung. Wie soll bei ihr der Reibungswiderstand überwunden werden? Durch Schmierung, etwa Kriechen bei Anwesenheit von Quarz und Wasser in flacheren Tiefen? Warum das Zurücktretan vieler Reflektoren in der Oberkruste? Ist sie zu kompliziert gebaut, zu sehr durch Intrusionen gestört (Abb. 10)? Je tiefer, desto mehr ungelöste Fragen, bei der Natur der Moho beginnend. Sie können ohne Erörterung der Petrologie hier nicht diskutiert werden. Dasselbe gilt für die Grenze Lithosphäre/Asthenosphäre mit dem erwähnten dort häufig anzutreffenden »Low Velocity Layer«. Sind dies aufgeschmolzene Gesteine? Dienen sie als Schmiermittel bei der Plattenbewegung?

Ohne Eingehen auf petrologische und geochemische Details kann hier auch nicht auf die Boten aus der Tiefe, die Xenolithe, eingegangen werden. Diese Minerale wurden bei Eruptionen in Basalt- und Kimberlitschlotten durch die Kruste hoch befördert und verraten das Material, aber auch unter günstigen Umständen die damaligen Druck- und Temperaturbedingungen bei der Mineralbildung. Der Stockwerkbau des Eifel-Untergrunds konnte zum Beispiel dadurch neuerdings mit entziffert werden (Fuchs et al., 1983).

Und schließlich: Letzte Gewißheit über Gesteine, Flüssigkeiten, Gase, die Spannungsverteilung und sonstige geophysikalische Meßgrößen aus diesen Tiefen erhält man, wie in der Tiefsee, nur durch *Bohrungen*. Das deutsche Kontinentale Tiefbohrprogramm, das zur Zeit nach vielen Richtungen hin vorbereitet wird, soll solche Möglichkeiten bieten. Die Sowjetunion ist hier weltweit voraus mit der schon jetzt über 12 km tiefen Bohrung auf der Halbinsel Kola, die 1979 begonnen worden war. Bei ihr hat sich beispielsweise herausgestellt, daß geophysikalische Hinweise auf eine Grenze zwischen »granitischer« und »ba-

saltischer« kontinentaler Kruste (Abb. 10) getrogen haben. In der angenommenen Tiefe wurde weiterhin durch offensichtlich dieselben Gneise gebohrt. Diese Bohrung ist aber nur ein Beispiel für viele, zum Teil schon 1970 angelaufene weitere Tiefstbohrungen in der Sowjetunion. Alle liegen auf den erwähnten tiefseismischen Profilen (S. 408), zumeist auf Kreuzungspunkten. Die gleichfalls auf 15 km geplante Bohrung in Aserbeidschan hat jetzt rund 8,5 km erreicht. Weitere sind im Gange im Ural, Nordkaukasus und im Nordteil des Riesengasfelds Urengog im nördlichen Westsibirien.

Qualitatives und Quantitatives in der Geologie

Grundsätzliches

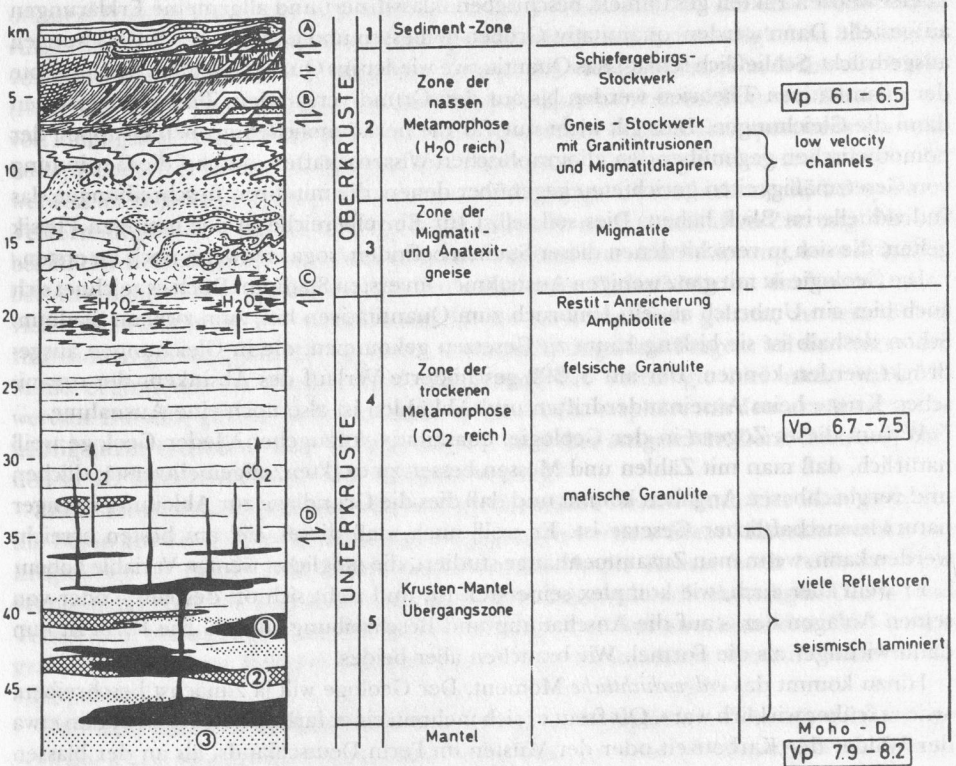
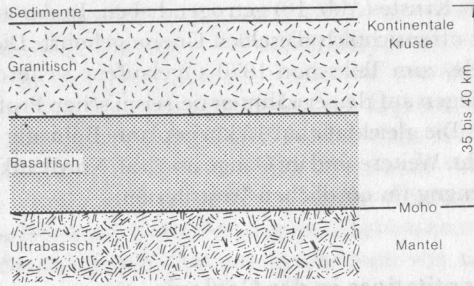
Nach einer verbreiteten Auffassung schreitet die Wissenschaft in drei Stadien fort (Jost). Zuerst werden Fakten gesammelt, beschrieben, klassifiziert und allgemeine Erklärungen aufgestellt. Dann werden, quantitativ, Größen gemessen und Gesetze durch Gleichungen ausgedrückt. Schließlich schlägt das Quantitative wieder ins Qualitative um: Die Konzepte der quantitativen Theorien werden bis auf den Grund verstanden, Theoreme ersetzen dann die Gleichungen. Dies gilt nicht nur für die herkömmlichen großen Gruppen der nomothetischen gegenüber den idiographischen Wissenschaften, der auf die Gewinnung von Gesetzmäßigkeiten gerichtetes gegenüber denen, die mit ihren Beschreibungen das Individuelle im Blick haben. Dies soll selbst für Einzelbereiche in der heutigen Physik gelten, die sich in verschiedenen dieser Stadien befinden, sogar teilweise noch im ersten.

Die Geologie ist mit ganz wenigen Ausnahmen im ersten Stadium. Doch es zeichnet sich auch hier ein Umbruch ab, ein Umbruch zum Quantitativen hin, zum zweiten Stadium. Schon deshalb ist sie bislang kaum zu Gesetzen gekommen, die in Gleichungen ausgedrückt werden können. Der auf S. 392 geschilderte Verlauf des Absinkens der ozeanischen Kruste beim Auseinanderdriften und Abkühlen ist also noch eine Ausnahme.

Warum dieses Zögern in der Geologie, quantitativ vorzugehen? Jeder Geologe weiß natürlich, daß man mit Zählen und Messen besser zu exakten, allgemeinverständlichen und vergleichbaren Angaben kommt und daß dies die Grundlage zur Ableitung strenger naturwissenschaftlicher Gesetze ist. Er weiß auch, daß dieses Ziel am besten erreicht werden kann, wenn man Zusammenhänge studiert, die möglichst wenige Variable haben.

Er weiß aber auch, wie komplex seine Welt ist, und zieht sich oft deshalb – oder von seinen Anlagen her – auf die Anschauung und Beschreibung zurück. Die Form ist ihm dann wichtiger als die Formel. Wir brauchen aber beides.

Hinzu kommt das *erdgeschichtliche* Moment. Der Geologe will ja zunächst beschreiben, »wie es früher wirklich war«. Oft freut er sich mehr an einer farbigen Rekonstruktion etwa der Wälder der Karbonzeit oder der Wüsten im Perm Deutschlands, als an der blassen Abstraktion einer Ableitung von etwaigen Zyklen, in denen gehäuft Kohlen gebildet wurden. Für seine normale Arbeit genügt es ihm auch, die heutige Verbreitung der Riffforallen zu kennen, um die Klimagürtel der Vorzeit aufstellen zu können. »Riffforallen« sind ein Begriff mit mehr Farbe als Meßwerte des Temperaturverlaufs, des Salz- und Sauerstoffgehalts, der Transparenz des Meerwassers, die ihr Milieu quantitativ erfassen.



Ein weiteres: Seine Fragen können selten durch *Experimente* beantwortet werden. Als Gründer einer experimentellen Geologie wird James Hall (1761–1832) angesehen, ein engagierter Verteidiger James Huttons (S. 382). Er hatte zum Beispiel in einer Glaschmelze beobachtet, daß sie bei langsamem Abkühlen kristallin, bei schnellem glasig erstarrt. Danach hat er Basalt aufgeschmolzen und beim unterschiedlichen Abkühlen dasselbe beobachtet. Weitere Ansätze lieferte Daubrée 1879 in seinen »Études synthétiques de géologie expérimentale«. Physikalisch ausgerichtet sind zum Beispiel die vielen Experimente zum Verhalten von Sedimentpartikeln in stehenden und strömenden Wasser und die Wirkung des Transports auf diese, etwa in Laboratorien mit Strömungskanälen. Ein Pionier in quantitativer Hinsicht war Gilbert (1914). Chemische Laboratoriumsversuche, etwa die berühmt gewordenen von Van't Hoff zwischen 1893 und 1908 brachten Licht in die Bildung von Karbonaten, Sulfaten und Chloriden bei der Einengung von Meerwasser durch Verdunstung. Bodenmechanische Untersuchungen helfen bei der Deutung von tektonischer Deformation mittels Brüchen oder plastischem Fließen.

Im Feld sind die submarinen heißen Quellen, aktiven Vulkane, Fluß- oder Grundwasserbewegungen natürliche Experimente. Manchmal eilt das Laborexperiment dem Naturexperiment voraus, etwa bei der Untersuchung von Trübungsströmen, die für ganze Sedimenttypen wie den etwa in den Alpen weit verbreiteten Flysch verantwortlich sind (Kuenen seit 1950, J. Geol.).

Abb. 10: Schema des Aufbaus der kontinentalen Kruste.

a) Herkömmliches Modell: Unter einer dünnen Decke von wenig veränderten Sedimenten (s. S. 406) folgen die »granitischen« und dann die »basaltischen« Lagen der Kruste. Sie machen jeweils deren halbe Mächtigkeit aus. Die Grenzregion zum Erdmantel ist die Mohorovicic-Diskontinuität (Moho). Sie kann in bis 70 km Tiefe (Himalaya) liegen.

b) Neues Modell: Wie oben (a) tritt ein Lagenbau hervor, der freilich viel komplizierter ist als bisher angenommen. Einfluß nehmen dabei phasenpetrologische, chemische, physikalische Faktoren. Fluide Phasen mit oder ohne Intrusionen, tektonische Abscherung, »Creeping« u. a. sind dynamische Elemente, die berücksichtigt werden müssen. Aus mineralogischen Gründen sind dabei 300 °C eine wichtige Schwelle für erhöhte Mobilität der Gesteine.

Unter den Sedimenten folgen danach das Gneis- und das Migmatit-Stockwerk der Oberkruste. Migmatite gehen aus partieller Aufschmelzung metamorpher Gesteine hervor. Man beachte die große laterale Inhomogenität und die Bereiche intrakrustaler Abscherung. Sie ist beim Typ A im Schweizer Jura gegeben, B im Hohen Venn und in den Appalachen, C im Schwarzwald und in der Böhmisches Masse. Diesen Bereich hofft man mit der geplanten deutschen kontinentalen Tiefbohrung zu durchteufen. D wird in der Ivrea-Zone der Südalpen angenommen.

In der Unterkruste herrschen die Granulite vor, feinkörnige, feldspatreiche Gneise mit Granat. (Felsisch: Feldspat und Silikate, also helle Minerale bestimmen das Bild, mafisch: Mg-Fe-Silikate, d. h. dunkle Minerale wie Amphibol, Pyroxen, Olivin.) Die letzteren nehmen in der Übergangszone zum Mantel zu, in der basische und ultrabasische Intrusionen auftreten (1,2). Peridotit (3) ist das hier angenommene dunkle Tiefengestein des Mantels, mit hohem Anteil von Olivin. Die Geschwindigkeiten der seismischen Longitudinal- oder Kompressionswellen (V_p) steigen darin sprunghaft auf Werte über 8,0 km/sec. an.

(Vereinfacht nach DFG, Mitt. XIV, Kommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung, 1985, S. 161).

Es geht bei den meisten dieser Versuche um ein besseres Verständnis von heute ablaufenden oder früheren Prozessen, mit dem man geologische Befunde besser deuten kann. Oft genug sind es aber auch qualitative Ansätze, Modellversuche, die dann besonders unter der Verkleinerung der Größen- und Zeitmaßstäbe und der Änderung mechanischer Eigenschaften des verwandten Materials leiden, z. B. in der Tektonik.

Noch ein letztes Hemmnis, das *Individuelle*. Der Geologe individualisiert zunächst *räumlich*. Er beschreibt einen Ausschnitt der Erdoberfläche und ihres Untergrunds, und er ist sich der Mannigfaltigkeit der Verhältnisse selbst in Dimensionen bis in zwei benachbarte Baugruben hinein stets bewußt. Er ist dazu erzogen, nicht nur an seinen direkten geologischen Befund in der Grube zu denken, sondern an die engere und weitere Umgebung, etwa an die Gefahren eines Hangrutsches, an die Auswirkung eines eventuellen Erdbebens, an den mit den Jahreszeiten wechselnden Grundwasserstand. Er muß mit all diesen Kenntnissen den Bauingenieur beraten. Dieser muß hingegen – oft genug durch solches Komplizieren recht gestört – zu ökonomisch vernünftigen und doch für die Sicherheit ausreichenden Kennziffern kommen, zu x oder y kg/cm², mit denen er den Grund belasten kann.

Ähnlich sieht der Geologe einen Fluß als Individuum, mit dem Wechsel der Gesteine und der Vegetation auf seinem Lauf und mit deren Veränderungen in der Geschichte. Auch hier muß er die Flußbaulaboratorien, die Formeln oder Kennziffern ansteuern, beraten. Oder: Jede Erzlagerstätte ist ein Individuum, trotz aller notwendigen Typisierung in der Forschung oder gar in Lehrbüchern. Und natürlich lernt trotzdem jeder Spezialist, der an einer der hydrothermalen Lagerstätten von Erzen mit Kupfersulfiden oder Bleiglanz und Zinkblende arbeitet, etwas von den neuen Befunden der erwähnten submarinen heißen Quellen.

Wie wiederholt betont, individualisiert der Geologe vor allem *zeitlich*. Er weiß, um zum Fluß zurückzukommen, daß man nicht zweimal in denselben Fluß steigt. Trotz gleichbleibender Gesetze des Wasserkreislaufs, des Strömungsmechanismus, der Erosion und Sedimentation ändert sich die Form des Flußbetts, die mitgeführte Fracht und anderes mit dem sich geschichtlich ständig ändernden Rahmen. Es handelt sich um jeweils zeitlich einmalige Verhältnisse. Dies gilt für jeden Zeitschnitt in der Erdgeschichte, worauf später noch näher eingegangen werden soll.

Das Individuelle! Vielleicht spielt auch die *Persönlichkeit*, der Charakter derer eine Rolle, die im Normalfall, oder die bisher Geologe wurden. Weithin sind die weltweit rund 550 000 Geologen stolz, allein etwas herauszufinden, im Busch oder Urwald, in Hochgebirgen und flachen Wüsten und vor allem auf dem kleinen Kartenblatt, das sie gerade bearbeiten. Im Gegensatz zu anderen Wissenschaften, in denen Teamwork allein schon durch die Größe der Aufgabe oder der dazu notwendigen Geräte oder Mittel zwingend ist, kommt man hier auch weiterhin noch vielfach mit »mente et malleo«, also allein aus – bis man auf ein Forschungsschiff geht, auf Bodenschätze exploriert oder gar eine Tiefbohrung plant!

Fortschritte

Wo gibt es nun nach all diesen eher negativen Bemerkungen Fortschritte im quantitativen Denken und Vorgehen? Zunächst wird in allen Zweigen der Geologie mehr *gemessen* und wird der Tatbestand zahlenmäßig erfaßt. Dieser neue Trend braucht freilich nicht immer neue Ideen zu beinhalten, doch dies gilt auch in anderen Zweigen der Wissenschaft. Sodann hat die *Statistik* überall Einzug gehalten, vor allem in der Sedimentologie und Petrologie, aber auch in der Geomorphologie oder Paläontologie, wo zum Beispiel Gauss-Kurven für morphologische Parameter bei der Abgrenzung von Arten, daher bei der Untersuchung der organischen Evolution, helfen. Faktor- und Trendanalysen, Korrelationstechniken, Methoden der mathematischen Simulation u. ä. weisen auf Herkunft von Sedimentpartikeln hin, helfen bei der Unterscheidung verschiedenster Sedimentationsräume mit ihrer »Fazies«, d. h. auch mit ihrem organischen Inhalt. Die glänzenden Ergebnisse solcher Methoden bei der Rekonstruktion der globalen Temperaturverteilung des Oberflächenwassers vor 18000 Jahren – und da das Bild im Sommer wie auch im Winter (!) – wurden schon auf S. 397 hervorgehoben.

Pioniere für die Anwendung quantitativer Methoden waren unter anderem Sorbes (1908) oder, mit großem Echo, Krumbein und Sloss (1958). Die Einführung des Computers mit den Fortschritten im »Data processing« und das Aufblühen einer »Mathematischen Geologie« (Zeitschrift seit 1969) halfen dabei sehr. Die zunehmenden Kontakte zwischen der Geologie und der Geophysik haben aber besonders stimulierend gewirkt.

Beispiele

Absolute Altersangaben

Grundlage jeder eventuellen Gesetzmäßigkeit im erdgeschichtlichen Ablauf ist eine absolute und genaue Datierung der Befunde. Erst dann können zum Beispiel Geschwindigkeiten, etwa der Kontinentalwanderungen, der vertikalen Bewegungen in Gebirgen oder Sedimentationsbecken, des Sedimentationsverlaufs, aber auch der organischen Evolution angegeben und weiterverarbeitet werden. Erst dann kann man Zyklen, etwa der Klimaveränderungen, der orogenen tektonischen oder der vulkanischen Aktivität bestimmen und dann nach eventuellen Ursachen fragen.

Es ist allgemein bekannt, daß das Alter der Erde bis ins letzte Jahrhundert hinein als viel zu kurz angenommen worden ist. Bischof James Usher (1581–1656) rechnete auf Grund der Genealogien im Alten Testament mit nur rund 4500 Jahren. Er wird daher neuerdings von den Kreationisten im Prinzip hoch verehrt, kommt er ihnen doch damit für viele ihrer Schlüsse weit entgegen. Es ist erstaunlich, daß für manche die Bedeutung des Menschen in dem Maß abnimmt, in dem die Erdgeschichte länger wird! Schon Ende des 19. Jahrhunderts gab es indessen aus Berechnungen von Sedimentmächtigkeiten und Sedimentationsraten Annäherungen an die heutigen Annahmen. Gouldchild leitete damals beispielsweise damit die Zeit, die seit dem Kambrium verflossen ist, mit 704 Millionen Jahren ab (vgl.

Tab. 1). Der Durchbruch kam aber mit der Erforschung des radioaktiven Zerfalls einiger Elemente seit Beginn unseres Jahrhunderts.

Die absolute Zeitbestimmung beruht darauf, daß dieser Zerfall irreversibel abläuft. Man muß zudem annehmen, daß der Zerfall von äußeren Faktoren nicht beeinflusst wird, daß die dabei bestimmten Konstanten auch konstant blieben, daß es sich um geschlossene Systeme handelt, daß das Mineralalter mit dem Gesteinsalter übereinstimmt u. ä. All dies setzt jeweils eine kritische Probenahme und Diskussion voraus. Es ist daher kein Wunder, daß bei den Angaben der Tab. 1 bisher nur grob alle 2 Millionen Jahre eine solche Bestimmung verwandt werden konnte.

Die Genauigkeiten hängen von den verwendeten Isotopen und deren Halbwertszeiten des Zerfalls ab, verschlechtern sich daher, je älter die Gesteine werden: ^{14}C hat beispielsweise eine Halbwertszeit von $5,7 \times 10^3$ Jahren, ^{230}Th von $7,5 \times 10^4$, ^{234}U von $2,5 \times 10^5$, ^{40}K von $1,3 \times 10^9$ und ^{87}Rb von $5,0 \times 10^{10}$ Jahren.

Die erstaunlich hohe Auflösung der letzten 100 000 Jahre mit Hilfe zusätzlicher Methoden wurde schon erwähnt (S. 397). Daß diese bald auf 1 Million Jahre erweitert werden kann, ist nach S. 396 zu erhoffen.

Leider sind Jahreskalender in Baumringen, Korallen, Muschelschalen, Warven-Sedimenten räumlich und zeitlich so große Singularitäten, daß nur wenige zu wirklichen erdgeschichtlichen Ableitungen verwendet werden können. Ein Beispiel sind die Korallen, die anzeigen, daß evtl. die Tage durch Gezeitenreibung in der Erdgeschichte immer länger geworden sind, die Zahl der Tage im Jahr also geringer (424 im Kambrium gegen heute 365) wurde.

Die *relative* Zeitrechnung in der klassischen Stratigraphie beruht auch auf einem irreversiblen Vorgang, der Evolution der Organismen. Sie ist vor allem durch das Tiefseebohrprogramm durch gleichzeitige Verwendung der verschiedensten Mikrofossilien erstaunlich verfeinert worden und hilft damit auch bei der weltweiten Korrelation der Schichtalter und damit der Verengung des absoluten Altersnetzes.

Am Rande: Einer der ersten quantitativ interessierten Geologen, Charles Lyell, hatte die Auffassung, daß die Geschichte der Erde eine große Kette ist, in der sich die Einzelsituationen immer mehr der heutigen annäherten. In seinen »Principles of Geology« (1833) bestimmte er in den Tertiär-Abschnitten jeweils die relative Häufigkeit der »noch heute lebenden« Arten, die in diesen Fossilgemeinschaften damals bekannt waren: im Eozän (d. h. »Morgenröte der Gegenwart«) 3–4 Prozent, im Miozän (»Minderzahl«) 18 Prozent, im Pliozän (»Mehrzahl«) 40 Prozent und im Pleistozän Siziliens (»meist rezent«) 96 Prozent.

Druck- und Temperaturangaben aus der Lithosphäre

Seit Beginn unseres Jahrhunderts hat die experimentelle Petrologie erstaunliche Fortschritte gemacht. Es gibt dabei zwei große Arbeitsfelder. Zunächst wurden »im Mekka« für diesen Forschungszweig, im Geophysikalischen Laboratorium des Carnegie Instituts in Washington D. C., an *Silikatschmelzen* einfache Einstoff- und Mehrstoffsysteme untersucht. Damit bekam man Vorstellungen von den physikalischen Bedingungen beim Verlauf der

Mineralbildung beim Erstarren magmatischer Gesteine. Man hat viel dazugelernt bei der Anwendung der Ergebnisse auf die Natur, seitdem man die Rolle des Wassers bei den Experimenten mit bedacht hat und seitdem man auch bei höheren Drücken arbeitet.

In den frühen siebziger Jahren war ein weiteres allgemeines Interesse darauf gerichtet, Mineral- und Gesteinssynthesen unter kontrollierten Laborbedingungen, also etwa erhöhten Drücken und Temperaturen, durchzuführen, um so zu *Leitmineralen* für bestimmte Krustentiefen zu kommen. So kam man zu geologischen Barometern und Thermometern und konnte geodynamische Vorgänge exakter als früher erfassen. Beispiele sind die Bildungstiefen von Mineralen und Gesteinen, etwa von Diamanten, sind Hinweise auf den Krustenbau, d. h. auf Diskontinuitäten, die auf Strukturänderungen in den Mineralen oder aber auf Änderungen des gesamten Chemismus zurückgehen mögen, sind Hinweise auf das Maß und den zeitlichen Ablauf der Heraushebung von Gebirgen, sind quantitative Einsichten in die Gesteinsmetamorphose. Auch hier wurde einerseits versucht, mit einfachen Voraussetzungen und Modellen zu experimentieren und andererseits mit »schmutzigen« Systemen wie Tonen und Basalten. Eine Schwierigkeit liegt darin, daß direkte Messungen unter den hohen p-t-Bedingungen nicht einfach sind. Man begnügt sich also vielfach damit, die Proben aus dem Versuch herauszunehmen und dann zu messen – in der Hoffnung, daß sich ein erreichtes Gleichgewicht dabei nicht störend ändert. Die Kinetik, die Geschwindigkeit, mit der sich Gleichgewichtszustände einstellen, ist natürlich ein großes Problem für sich selbst.

Der Ehrgeiz geht neuerdings dahin, Messungen unter »währenden Bedingungen« zu machen, also bei andauerndem hohem Druck und Temperaturen. Es werden heute dabei 90 k bar und mehr und Temperaturen bis über 1000 °C beherrscht.

Eine weitere fruchtbare Methode zur Rekonstruktion der Bedingungen in größeren Erdtiefen ist das Studium von *Flüssigkeitseinschlüssen*. Erstaunlich ist dabei das oft mit eingeschlossene CO₂ und interessant die Diskussion, ob es und wieviel davon vom Erdmantel kommt.

Einige weitere geologisch wichtige Ableitungen: Die sogenannte *Glaukophan-Schiefer-Fazies* verrät hohe Bildungsdrücke bei niedrigen Temperaturen. Das blaue Silikat bildet sich bei etwa 20–30 km Gesteinsüberlast und Temperaturen von nur rund 400 °C und wird mit einigen weiteren deshalb als Leitmineral für Subduktionszonen angesehen. Solche werden neuerdings u. a. in der Oberkreide der Westalpen gesehen. Druck- und Temperaturbedingungen in der normalen Oberkruste werden derzeit an MgO-SiO₂-H₂O-Systemen untersucht. Die sogenannte Granulit-Fazies, feinkörnige, feldspatreiche Gneise mit Granat-Mineralen, (Abb. 10) hingegen verrät Näheres über noch höhere Drücke und Temperaturen. Zutage tritt die Fazies zum Beispiel im Granulit-Gebirge Sachsens oder in Finnland.

Dies zur Geodynamik. Das zweite große Untersuchungsfeld in p-t-Laboratorien ist die Bestimmung der Geschwindigkeiten seismischer Wellen, das strukturelle, optische, elektrische und thermische Verhalten der Minerale, damit *geophysikalische Feldbefunde* besser gedeutet werden können.

Tab. 2: Weltreserven an Mineralöl, Erdgas und Kohle
Gesamt: 675 = 100 Prozent

Milliarden t Öläquivalent	Mineralöl 13%	Erdgas 12%	Kohle 75%
Nordamerika	11,3	9,0	145,2
Karibik, Südamerika	4,6	2,6	9,8
Westeuropa	2,2	4,8	58,6
Afrika	8,0	5,6	43,0
Mittlerer Osten	48,2	19,7	0,3
Ferner Osten, Australasien	2,7	4,1	44,1
UdSSR und Osteuropa	11,8	31,6	140,1
VR China	2,4	0,7	64,5
	91,2	78,1	505,6

Die Globalzahlen weisen auf die große Bedeutung der Kohle hin. In regionaler Hinsicht fallen die großen Unterschiede auf. So liegen fast 37 Prozent der Reserven an fossiler Energie im Ostblock, einschließlich der VR China, nur 10 Prozent in Westeuropa. Die Kohlevorkommen in den Ländern des mittleren Ostens sind unbedeutend. Sie besitzen dagegen rund 53 Prozent der Öl- und 25 Prozent der Gasreserven der Welt. (Die Weltresourcen, d. h. die geschätzten, nicht nachgewiesenen Gesamt-vorräte, dürften bei – konventionellem – Öl und Gas rund dreimal höher liegen, bei Kohle rund siebenmal.)

Nach Shell Briefing Service, Dez. 1984 (und Diskussionen auf dem 27. Internat. Geol. Congress, Moskau, August 1984).

Simulationsmodelle zur Entstehung von Kohlenwasserstofflagerstätten

Noch vor 30 Jahren dachten im wesentlichen nur akademische Kreise über die Mechanismen der Erdöl- und Erdgasbildung nach. Die Praktiker sagten vielfach, daß »das Öl da sei, wo man es findet«. Inzwischen hat sich manches durch den rasch steigenden Verbrauch verändert. Rechnete man noch 1940 mit 40 Milliarden t an globalen Erdölreserven, so waren es 40 Jahre später das Vierfache, 160 Milliarden t. 70 davon wurden freilich seit nur 100 Jahren schon verbraucht (Tabelle 2).

Man findet Kohlenwasserstoffe im wesentlichen in Sedimentbecken und nimmt deshalb allgemein an, daß sie *biogen* sind, d. h. aus pflanzlichem und tierischem Material entstehen, das in Sedimente eingebettet wird. Das ist sehr wenig, man schätzt, nur 0,1 Prozent der organischen Produktion. Es besteht zunächst aus Kohlehydraten, Lignin, Proteinen, Lipiden u. ä. organischen Verbindungen und bildet sich in den Sedimenten zum Teil in das hoch molekulare, unlösliche »Kerogen« um. Durch Einwirkung erhöhter Temperaturen und auch Drücke und durch mikrobiellen Abbau geht die Umwandlung weiter. Erdölähnliche Ausgangssubstanzen konzentrieren sich, und ab 50–70 °C werden zusätzlich aus dem Kerogen neue Kohlenwasserstoffe gebildet.

Solche erhöhten Temperaturen werden weitgehend durch Absenkung und Überdekung der Sedimente erreicht – aber nicht allein dadurch. Aus der schematischen Abb. 11

ist zu entnehmen, daß dieser Schwellenwert im allgemeinen bei mehr als 1 km Sedimenttiefe erreicht wird. Bei rund 1200 m setzt dann die Ölbildung verstärkt ein, mit einem Maximum um 2600 m.

Dies ist übrigens der Grund, daß Gebiete mit Sedimenten von weniger als 1–2 km Mächtigkeit praktisch nicht erdöhlöffig sind. Das hat die enttäuschende Konsequenz, daß mehr als 80 Prozent der Ozeanböden für die Erdölexploration ausfallen. Sie sind zu jung, daher zu dünn mit Sedimenten bedeckt. Umgekehrt nehmen deren Mächtigkeiten landwärts zu, da mit dem Altern der Ozeankruste mehr Zeit zur Verfügung stand und die terrestrische Anlieferung, etwa von Sanden und Schlammen, natürlich gleichfalls zunimmt. Diese landnahen Sedimentmächtigkeiten und ihre Beziehungen zu potentiellen Erdöllagerstätten spielen übrigens bis in die Definitionen einzelner Einflußzonen bei der Seerechtskonferenz hinein.

Überschreitet die Absenkung etwa 3200 m, so geht die Ölbildung stark zurück, weil das Ausgangsmaterial abnimmt, vor allem aber, weil ein großer Teil durch die erhöhten Temperaturen in kurzketzige Kohlenwasserstoffe zerlegt, zu Erdgas gekrackt wird. Man spricht von einem »Ölfenster«, hier zwischen 1200 und 3000 m, in dem sich bevorzugt Öl bilden kann. Die Temperatur spielt bei diesen Reaktionen die wichtigste Rolle, nimmt doch deren Geschwindigkeit bei 10 °C Erhöhung um das Zwei- bis Dreifache zu. Doch auch die Zeit spielt herein, freilich nur linear, nicht exponentiell. In der Geologie muß man

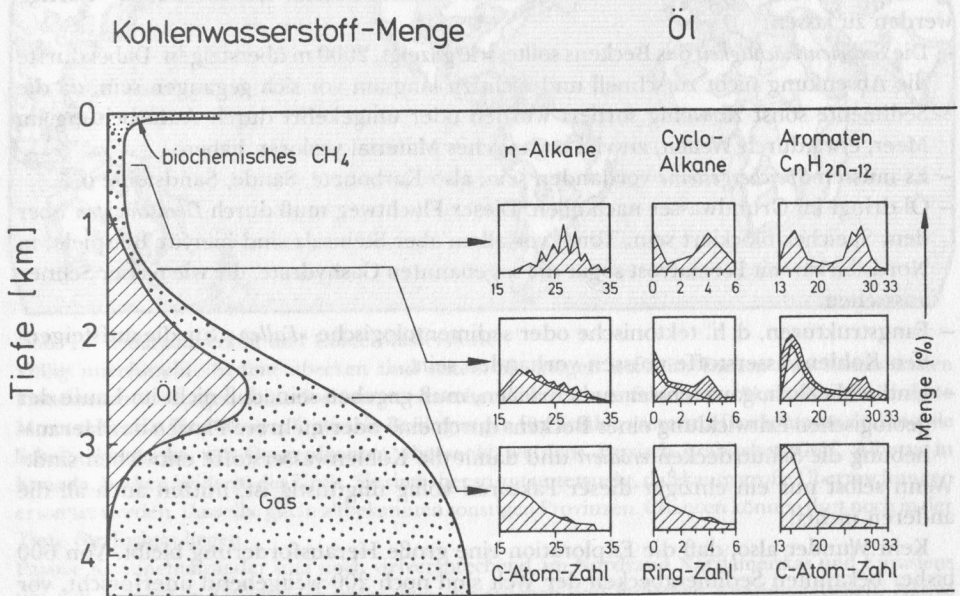


Abb. 11: Schematische Darstellung der Bildung von Kohlenwasserstoffen und der Änderung charakteristischer geochemischer Parameter mit der Tiefe. Ähnlich schematisch kann angenommen werden, daß typische Temperaturwerte für den Beginn der Ölbildung bei 50 °C liegen, für die Hauptphase bei 90 °C und für das Ende bei 175 °C.

(Nach Bender, 1984, S. 6).

aber sehr damit rechnen, und lange Bildungszeiten können auch bei niedrigeren Temperaturen Wirkung haben. Erhöhter Wärmestrom, evtl. unter den Hinterbogenbecken der Abb. 3, läßt Öl auch in jüngeren Sedimenten reifen. Dies gibt zum Beispiel Hoffnungen für die Ränder des Philippinen-Meers und für Offshore-Gebiete von China bis Indonesien.

Der Reifungszustand kann in Laboratorien bestimmt werden, da sich geochemische Änderungen in der Art der Abb. 11 abspielen, also etwa: Die ungeradzahligen n-Alkane als Zeichen biologisch gebildeter Kohlenwasserstoffe nehmen ab, die Kettenlänge gleichfalls usw. Außerdem nehmen Reflexionswerte organischer Partikel, wie Vitrinit, quantitativ bestimmbar zu und geben den »Inkohlungsgrad« an. Ferner verändern sich Farben von Sporen u. a. in regelhafter Weise. Erdgas wird übrigens auch schon vor Erreichen des Ölfensters gebildet, als CH_4 , Methan, durch Bakterien (Abb. 11).

Die Kohlenwasserstoffe bleiben – glücklicherweise – nicht nur in den meist feinkörnigen Sedimenten, in denen sie sich bilden, also in den »Muttergesteinen«, wie man diese nennt, wenn ein gewisser Minimalgehalt von Kerogen angenommen werden kann. Sie *migrieren*, wandern in poröse und schließlich auch permeable Speichergesteine und dies auf Wegen bis viele Zehner von Kilometern weit. Die Kompaktion der Sedimente dürfte dafür ein wesentlicher Antrieb sein, doch ist der ganze Mechanismus der Migration noch reichlich unaufgeklärt.

Es gehören aber noch eine Reihe weiterer Faktoren dazu, um ein Gebiet »höffig« werden zu lassen:

- Die *Sedimentmächtigkeit* des Beckens sollte, wie gezeigt, 2000 m übersteigen. Dabei durfte die Absenkung nicht zu schnell und nicht zu langsam vor sich gegangen sein, da die Sedimente sonst zu wenig sortiert wurden oder umgekehrt durch Aufarbeitung im Meer, etwa durch Wellen, zu viel organisches Material verloren haben.
- Es müssen *Speichergesteine* vorhanden sein, also Karbonate, Sande, Sandsteine o. ä.
- Öl dringt im Grundwasser nach oben. Dieser Fluchtweg muß durch *Deckschichten* über dem Speicher blockiert sein. Tone, vor allem aber Steinsalz sind hierfür Beispiele, in Nordsibirien mit Permafrost sogar die sogenannten Gashydrate, die wie nasser Schnee aussehen.
- Fangstrukturen, d. h. tektonische oder sedimentologische »*Fallen*« für die aufsteigenden Kohlenwasserstoffe müssen vorhanden sein.
- Und schließlich, ganz schwer zu beurteilen, muß gegeben sein, daß nicht im Laufe der geologischen Entwicklung eines Beckens durch eine oder mehrere Phasen der Heraushebung die Schutzdecken *erodiert* und damit die Kohlenwasserstoffe entwichen sind. Wenn selbst nur ein einziger dieser Faktoren völlig ungünstig ist, nützen auch all die anderen nichts!

Kein Wunder also, daß die Exploration eine große Herausforderung bleibt. Von 600 bisher bekannten Sedimentbecken der Welt sind noch 200 weitgehend unerforscht, vor allem »off-shore« und in hohen Breiten. Aus 160 dieser Becken wird derzeit gefördert (Abb. 12). Ein neues Hilfsmittel zur Exploration entwickelt sich derzeit mit der *Computer-Simulation* der Entwicklung derartiger Sedimentbecken (Welte u. a., in Veröffentlichungen seit 1978). Man erstellt dabei zunächst nach den vorhandenen Geländekenntnissen und einem konzeptionellen Modell, das den obigen Überlegungen folgt, ein mathemati-

sches Modell. Dabei gibt man Größen ein wie Sedimentmächtigkeiten und Sedimentationsgeschwindigkeiten, damit also auch den zeitlichen Verlauf der Beckenabsenkung in Raum und Zeit, p-t-Bedingungen, Reifegrad der organischen Substanz, Kompaktion u. ä. Man legt ein Raster von Knotenpunkten über das Gebiet und rechnet nach diesen Punkt-Informationen flächenhaft das vermutete Geschehen durch. Diese Ableitungen werden dann dort, wo Informationen, etwa durch frühere Bohrungen, verfügbar sind, an der Wirklichkeit geprüft. Schrittweise werden durch Änderungen der Parameter oder des Konzepts selbst die ursprünglichen Fehlannahmen korrigiert, so daß die Abschätzung des Kohlenwasserstoffpotentials immer genauer werden kann – ein weiteres Beispiel für das Vordringen quantitativer Methoden in der Geologie.

Hier könnten noch weitere Modelle vorgestellt werden, zu den erwähnten klimatologi-

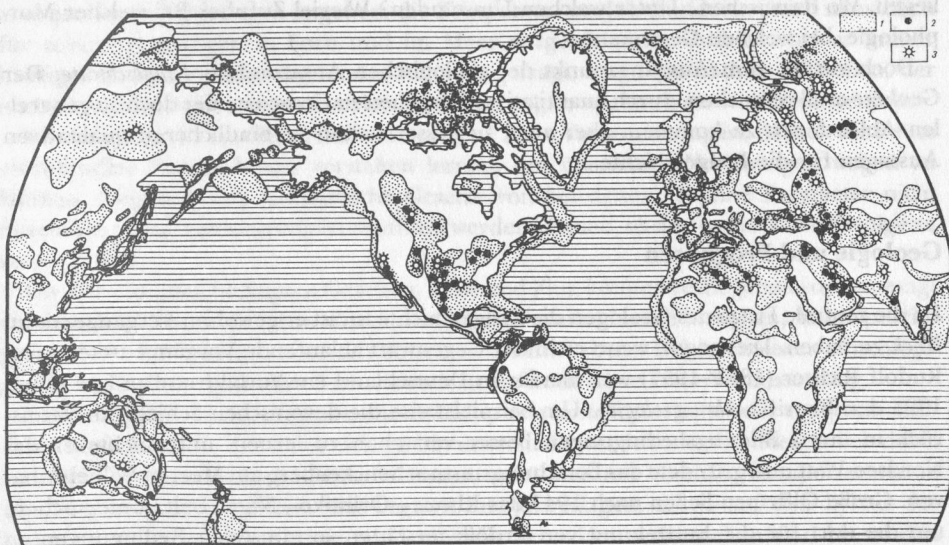


Abb. 12: Sedimentbecken und Kohlenwasserstoffe.

Völlig unerforschte Sedimentbecken sind selten. Sie mögen noch im Innern von kontinentalen Plattformen verborgen sein, doch sie versprechen keine Riesenerfelder, das ökonomisch wichtigste Moment für die Exploration. Optimale Bedingungen für Kohlenwasserstoffvorkommen sind mobile Schelfgebiete, die vor Orogenfronten abgesenkt werden: Persisch-Arabischer Golf, Alberta in Kanada, Becken beidseits des Urals. Sie sind aber so gut untersucht, daß kaum große Überraschungen erwartet werden. Dasselbe gilt in altbekannten sonstigen Provinzen. Chancen können dort noch in der Tiefe für Erdgas liegen.

Passive Kontinentalränder sind noch vielversprechend am Nordrand Nordamerikas und Eurasiens um den Arktischen Ozean oder unter dem chinesischen und indischen Kontinentalschelf. Aktive Kontinentalränder versprechen für Riesenerfelder wenig.

Die wichtigste Aufgabe ist es derzeit, die Produktionstechnologie zu verbessern und dann das Potential von Ölschiefern und -sandstein zu entwickeln. 1 = Sedimentbecken, 2 = Riesenerdölfelder, 3 = Riesengasfelder.

(Nach Burollet, 27. Internat. Geol. Congress, Kolloquium 02, Moskau, August 1984).

schen oder ozeanographischen, die ja zunächst nur für die Grundlagenforschung interessant sind. In der Hydrogeologie kam man über solche, die die Mechanik der Fließbewegungen zum Inhalt hatten, zum Beispiel zu solchen, die gelöste Stoffe und ihre chemischen Reaktionen mit einschließen, also zu sehr anwendungsnahen Modellen. Gemeinsam ist all diesen Versuchen, daß sie ständig an Feldbefunden oder -experimenten gemessen und damit verbessert werden müssen, wie das »Remote sensing« an der »Ground truth«. Doch gibt es in quantitativer Hinsicht noch viel Einfacheres zu tun, etwa bei vielen *Umweltfragen*:

Wie schnell und wie unterschiedlich kommen die verschiedenen Verbindungen der Luft- und Regenfracht, des Kunstdüngers, der Pflanzenschutzmittel u. ä. ins Grundwasser, ins Meer? Oder: Völlig fehlende Niederschläge und damit fehlende Vegetation reduzieren die Flußfracht, steigern die Windfracht. Das Gegenteil, reichlich Regen und dichte Vegetation reduzieren beides. Dazwischen also muß die maximale Sedimentzufuhr liegen. Wo dazwischen? Unter welchen Umständen? Wieviel Zufuhr? Bei welcher Morphologie, bei welchen Gesteinen?

Doch zurück zum Ausgangspunkt des geologischen Ansatzes, zur *Erdgeschichte*: Der Geologe muß versuchen, durch quantitatives Vorgehen zu Gesetzen oder doch zu generellen Ableitungen zu kommen, aber auch zu besseren und verbindlicheren qualitativen Aussagen für die Erdgeschichte.

Geologie und Prognosen

Da die zentrale Frage des Geologen die Erdgeschichte ist, ist er gewohnt, Vergangenes im Blick zu haben. Dies sogar, wenn er in der Gegenwart ablaufende Vorgänge untersucht. Rudolf Richter (1881–1957) war hierfür in Deutschland ein Vorbild und prägte schon 1928 den Begriff »*Aktuogeologie*«. Um beispielsweise die devonischen Schiefer im Hunsrück in ihren Bildungsbedingungen besser verstehen zu lernen, untersuchte er das Nordsee-Watt und gründete das Forschungsinstitut Senckenberg am Meer in Wilhelmshaven. Große Ölfirmen ließen nach 1945 das Rhone-, Orinoko-, Niger-Delta untersuchen, um die dort für die Entstehung von Erdöllagerstätten so günstigen Bedingungen zu studieren und auf fossile Fälle anzuwenden. Man ging nach Saudi-Arabien und Oman, um die Sedimentationsprozesse und deren Produkte an rezenten Wüstenbeispielen zu untersuchen, damit die unterschiedlichen Ablagerungen des »Rotliegenden« (Perm, zwischen etwa 290 und 260 Millionen Jahren) unter der Nordsee nach deren Eigenschaften, Ausdehnung, Abfolge u. ä. besser beurteilt, d. h. auch mit weniger Bohrungen die richtigen Speicher angefahren werden konnten. Dort ging es also auch um Erdgas und große Finanzmittel.

Angesichts der Bevölkerungsexplosion in weiten Teilen der Erde, der Zusammenballung in urbanen Zentren, des zunehmenden Verbrauchs an Rohstoffen, vom Grundwasser und Boden bis zu Erzen und Energieträgern, aber auch angesichts der zunehmenden Abfälle, die in den Boden, ins Grundwasser, ins Meer und etwa als CO₂, Schwefel- und Stickstoffverbindungen in die Luft abgegeben werden, wird von immer mehr Geologen auch der Blick in die Zukunft gefordert. Der Mensch selbst ist zu einem geologischen Faktor geworden: In den Industriestaaten soll er heute jährlich 2×10^7 g, d. h. 20 t

geologischer Materialien umsetzen. Wenn dies am Ende unseres Jahrhunderts 1 Milliarde Menschen tun werden, so steigt die Menge auf 2×10^{16} g im Jahr, d. h. auf eine Größenordnung, die der Produktion ozeanischer Kruste unter den mittelozeanischen Rücken entspricht. Die totale Erosionsleistung auf der Erde wird auf 10×10^{16} g/Jahr geschätzt. Die natürliche chemische Flußfracht, die das Meer erreicht, soll derzeit durch anthropogene Zutaten weit übertroffen werden: Das grob Zehnfache wird dadurch zugeführt bei Fe, Cu, Zn und Pb, das Fünffache bei Mn und Mo und gar das Hundertfache bei Zinn (Fyfe, 1981, Science). Wie wird dies alles im Jahr 2000 aussehen? Das ist schwer vorauszusagen, da ja der Mensch aus Schäden normalerweise klug wird.

Voraussagen für 20 Jahre sind im Grunde kein Gegenstand für Geologen, und selbst 50 Jahre, die Zeitspanne, mit der der Mensch normalerweise rechnet, also mit seinen Enkeln, gehören nicht eigentlich dazu. Trotzdem: Teilprobleme kann er mit organischen und anorganischen Jahreslagen angehen, die Zeitspanne von Jahrhunderten wird allmählich für seine Erhebungen in Seen und im Meer aufgeschlossen. Zudem wird er immer häufiger im lokalen oder regionalen Rahmen gefragt, wann das nächste Erdbeben, der nächste Vulkanausbruch zu erwarten sind, und sogar, wie stark sie wohl sein werden.

Wie weit sind wir bei diesen Anforderungen? Erste Voraussetzung ist, daß wir die heute ablaufenden *Prozesse* besser verstehen lernen, um überhaupt Vorhersagen wagen zu können. Liegen streng mechanische Gesetze vor, bei denen einzelne Parameter nicht durch den Menschen wesentlich beeinflußt werden können, so sind heute schon Erfolge zu verzeichnen:

Die astronomisch bedingten Gezeiten, Ebbe und Flut, können recht genau vorhergesagt werden. Vor Tsunamis, d. h. durch Erdbeben verursachten Flutwellen, kann präzise gewarnt werden – freilich erst nach Einsetzen des Erdbebens. Bei den meisten einschlägigen Modellrechnungen aber fehlt vielfach heute noch diese erste Voraussetzung.

Zweite Voraussetzung ist, daß mehr als bisher relevante historische oder erdgeschichtliche *Abläufe* auf diese Zusammenhänge hin untersucht werden müssen. Stellen sich dabei zum Beispiel klare zyklische Abläufe heraus, so können mit Vorsicht Extrapolationen in die Zukunft gewagt werden. Das beginnt mit Jahreslagen, die ja auf den Zyklus der Jahreszeiten zurückgehen, mag mit Sonnenfleckenzyklen weitergehen und bis zu den schon behandelten zyklischen Veränderungen der Erdbahn im Maßstab von Zehntausenden von Jahren führen.

Wären nur Mond und Sonne für geologische Vorgänge verantwortlich wie bei Ebbe und Flut, so könnte man voll Hoffnungen sein. Die Komplexität, die Häufigkeit von Schwellenwerten, die bei Überschreiten Kippreaktionen auslösen, die Bifurkation vieler Prozesse, die Voraussagen prinzipiell verhindern, stellen sich aber allorts in den Weg. Schließlich darf man auch einmalige Ereignisse, zum Beispiel Katastrophen aus dem Weltraum, nicht vergessen.

Beides, physikalisch-gesetzmäßige Abläufe und solche unvorhersehbaren Katastrophen, ist übrigens in den letzten Jahren auch durch die *Planetologie* ins Blickfeld der Geologen geraten. Diese versucht, durch vergleichende Studien die ersten 500–700 Millionen Jahre der Erdgeschichte zu entziffern. Diese bleiben anderen Methoden ja weitgehend oder ganz verschlossen. Umgekehrt wird sicherlich auch unter dem Eindruck der vielen Einschlagkrater auf Monden und Planeten überall auf der Erde nach weiteren

dem Nördlinger Ries verwandten Strukturen gesucht. Diese 26 km weite und ursprünglich 800 m tiefe kreisförmige Einsenkung um Nördlingen soll auf den Einschlag eines 1–2 km großen Objekts vor 15 Millionen Jahren zurückgehen. Rund 1000 Asteroiden dieser Größe sollen aber die Erdbahn kreuzen, mit der Wahrscheinlichkeit, daß drei von ihnen innerhalb einer Million Jahre auch auf der Erde auftreffen. Im selben Zusammenhang wird derzeit auch ungemein engagiert diskutiert, ob nicht der Einschlag eines kosmischen Körpers, eines »Boliden«, die vielen drastischen Wechsel von Faunenelementen an der Wende von *Kreide- zur Tertiärzeit* verursacht hat. Bekanntlich starben damals die mesozoischen Reptilien aus. Besonders die Landsaurier waren und sind dabei bis in die Tagespresse hinein betroffen. Große marine Gruppen der Mollusken erloschen völlig, etwa die als Leitfossilien so bekannten Ammoniten, die riffbauenden Rudistenmuscheln. Andere marine Faunen wurden völlig neu strukturiert: Beinahe sämtliche Gattungen der Plankton- und Großforaminiferen wurden durch neue ersetzt. Die Begeisterung für diese Hypothese ist so groß geworden, daß solche Ereignisse teilweise als wichtiger Motor für die Evolution der Organismen angesehen werden, als eine Chance für »Opportunisten«, die die Katastrophe überleben und sich danach mangels Konkurrenz rasch ausbreiten können.

Doch zurück zum eigentlichen Thema: Hinsichtlich der Prognosen ist die Geologie in einer fast so schwierigen Lage wie die Wirtschaftswissenschaften, bei deren Gegenstand freilich der Mensch selbst ein viel aktiverer, sogar der ausschlaggebende Faktor ist. Auch sie müssen Vorhersagen für die Zukunft auf das Vergangene gründen.

Beispiele

Einige Beispiele, in denen die Geologie versucht, auf die Zukunft zu sehen, seien anschließend behandelt. Sie sind von Methoden und Zielen her sehr heterogen.

In gewissem Sinn ähneln sich die ersten, Seismizität und Vulkanismus. In beiden Fällen kann der Geologe sehr gut die Großregionen definieren, in denen mit Erdbeben oder Vulkanausbrüchen gerechnet werden muß (s. Abb. 13). Auch in zeitlicher Hinsicht gibt es Anzeichen für Episoden mit verstärktem Vulkanismus, global etwa im mittleren Miozän, vor etwa 15 Millionen Jahren, oder im Pliozän, vor rund 4 Millionen Jahren. Umgekehrt soll – ausgerechnet zum Höchststand der letzten Kaltzeit, vor 18000 Jahren – zumindest auf der Nordhalbkugel vulkanisch Ruhe geherrscht haben. Doch diese Grobraster nutzen nicht viel. Vom Fuji, 100 km südwestlich von Tokio, werden seit dem 8. Jahrhundert mehr als 17 Eruptionen berichtet. Mit solchen Daten sind auch Langzeitvoraussagen möglich. Bei Erdbeben wie bei Vulkanausbrüchen treten aber im wesentlichen Katastrophen nur lokal auf. Wo und wann? Wie stark? sind daher die drängenden Fragen, d. h., es werden klare Vorhersagen verlangt.

Vulkane

Sie sind bisher am erfolgreichsten bei aktiven Vulkanen beantwortet worden. Die Bedrohung durch Ausbrüche beschränkt sich nicht auf die lokalen Geschehnisse, Lava-Ergüsse, Auswurf von Bomben bis Aschen, Ausströmen von heißen Gasen, Erdbeben oder sekundäre Schlammströme durch induzierte Regengüsse. Klassisch konnte dies ja seit der Antike in der Umgebung von Neapel studiert werden. Trotzdem fragt es sich auch heute noch, ob F. Nietzsche recht hat, wenn er schreibt: »Das Geheimnis um die größte Fruchtbarkeit und den größten Genuß vom Dasein einzuernten heißt: gefährlich leben! Baut eure Städte an den Vesuv!«

Dadurch, daß Aerosole bis in die Stratosphäre hoch geschleudert werden und dort jahrelang verweilen können, kann es indessen auch zu globalen Folgen kommen. Der Ausbruch des El Chichon in Mexiko (April 1982) ist in dieser Hinsicht seit dem des Katmai – in Alaska (1912) – das größte Ereignis auf der Nordhemisphäre. Es scheint so, daß schon im zweiten Monat nach einer derartigen Eruption auf der entsprechenden Hemisphäre die Oberflächentemperatur um etwa $\frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$ (in Sommermonaten) bis $1\frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$ (im Winter) absinken kann.

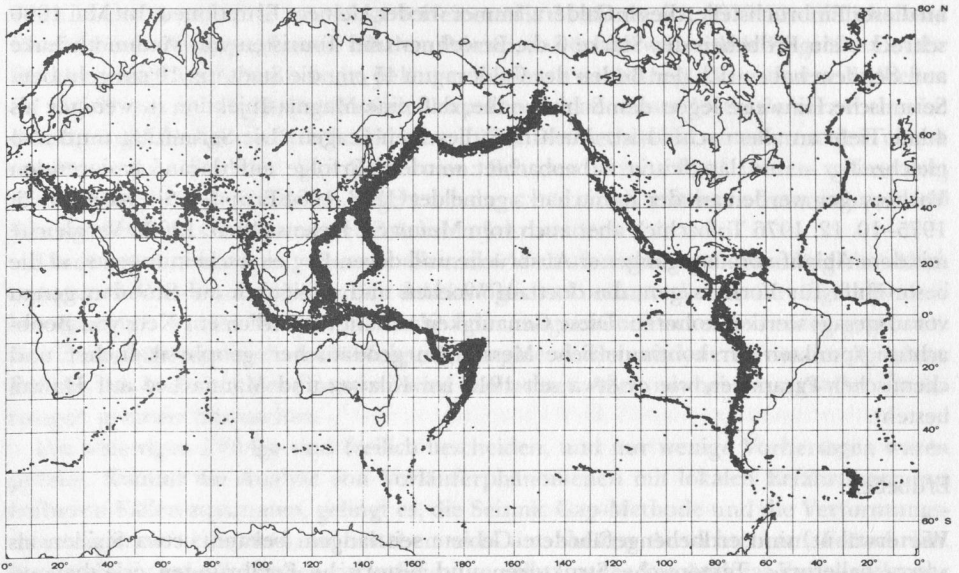


Abb. 13: Verbreitung der Epizentren von Erdbeben zwischen 1961–1967 mit Herdtiefen in den obersten 700 km.

Die allgemeine Vorhersage von Erdbeben für Großräume ist danach recht einfach. Sie häufen sich an den Rändern der Lithosphärenplatten, (Abb. 2) den divergierenden, im allgemeinen in der Mitte der Ozeane, daher weniger bedrohlich, oder den konvergierenden, besonders deutlich um die Ränder des Pazifiks, aber auch auf einem Gürtel zwischen Gibraltar und Neuguinea. Man achte aber auch auf die Intraplatten-Epizentren.

(Nach Barazangi & Dorman, 1969, Seismol. Soc. Amer. Bull. 59).

Derartige Untersuchungen müssen übrigens unbedingt vertieft werden, damit das Szenario eines »Nuclear Winter« hieb- und stichfester wird (Turco et al., 1983, Science). Bekanntlich ist dies eine ungemein bedrohliche Vorstellung der möglichen klimatischen Folgen eines »großen« Atomschlags. Die obere Atmosphäre würde danach mit Rauchpartikeln aus Flächenbränden erfüllt, die sich rasch um die Erde, zumindest um die betroffene Halbkugel legen und die Sonne verfinstern. Vieles ist dabei noch ungeklärt, auch die Länge und das Ausmaß der damit drohenden Abkühlung, die noch kontrovers diskutierte Folgen für alles Leben haben würde. Beiträge zur Behandlung dieser Fragen könnten, wie gesagt, Fallstudien an Vulkanausbrüchen liefern. Generelle Hinweise könnte nach weiterer Klärung sogar das Massensterben an der Kreide-/Tertiärwende geben.

Wie steht es aber mit der Vorhersage der Eruptionen? Man kann zunächst kritische Stellen des Vulkans laufend geodätisch vermessen. Vor dem Sommer 1982 hoben sich Teile der Phlegräischen Felder westlich Neapel um rund 2mm/Tag, danach um 4 mm/Tag im Herbst. Die Stadt Pozzuoli liegt mit bisher 40 cm Hebung im Zentrum, und die Mikrobeben in rund 1 km Tiefe versprechen nichts Gutes! Doch: Beruhigt sich das Gebiet wieder? Oder nicht? Die Situation gleicht den Vorphasen der letzten Eruption im Jahre 1538. Im Long Valley in Kalifornien liegt ein riesiger Kessel, der vor 700 000 Jahren nach einer vulkanischen Eruption zusammengebrochen ist. In den letzten 50 000 Jahren gab es an dieser Einbruchsstelle, dieser Caldera, immer wieder kleinere Eruptionen. Im Mai 1980 schreckte ein Erdbeben der Stärke 6 die Bewohner und Touristen von Mammoth Lake auf. Seitdem haben sich der Boden der Caldera um 45 cm, die Stadt um 10 cm gehoben. Seismische Hinweise legen den Schluß nahe, daß eine Magma-Injektion in weniger als 4 km Tiefe an allem schuld ist. Auch hier dieselben Fragen! Die Seismizität muß also gleichzeitig – und langfristig – beobachtet werden. Erfolge auf darauf basierenden Vorhersagen werden aus der Kamtchatka gemeldet (12. 3. 1964 Eruption Sheveluch, 6. 6. 1975–10. 12. 1976 Tolbachic), aber auch vom Mount St. Helens (18. 5. 1980). Vergleiche mit dem Ablauf vorausgegangener Ausbrüche und deren Begleiterscheinungen sind die beste Hilfe für Vorhersagen, die dort auf Wochen und schließlich auf Stunden genau vorausgesagt werden konnten. Diese Genauigkeit verlangt natürlich ein Netz von Beobachtungspunkten für kontinuierliche Messungen geodätischer, geophysikalischer und chemischer Parameter, wie es etwa seit 1912 am Kilauea und Mauna Leo auf Hawaii besteht.

Erdbeben

Wie erwähnt, sind erdbebengefährdete Gebiete seit langem bekannt, etwa Sizilien als »terra ballerina«. Tektonische Strukturen und historische Erfahrungen erlauben es, verschiedene Grade der Gefährdung auf Karten für die Raumplanung darzustellen. Man setzt Kernkraftwerke nicht gerade in Störungszonen. Man weiß auch, daß außer Schäden an Bauwerken durch Erdbeben Hangrutsche und Bergstürze ausgelöst und die Grundwasserverhältnisse erheblich gestört werden können. Wie aber kommt man zu wirklichen Vorhersagen?

Als wesentlichste Ursache gilt heute, daß eine allmähliche Anhäufung von Spannungen in der Erdrinde schließlich zu einem Brechen der Gesteine und damit zur Erzeugung

seismischer Wellen, zu Beben führt. Die vielen Heterogenitäten etwa durch unterschiedliche Gesteine und vorhandene Brüche erschweren es aber, aus der meßbaren Verformung, der Auswirkung dieser Spannungen, zu Vorhersagen zu kommen. Es sind viele stochastische Komponenten eingebaut. Immerhin kann man etwa aus dem Ausmaß eines praktisch bebenfreien lang anhaltenden »Kriechens« auf beiden Seiten einer Blattverschiebung und aus einer ruckartigen Dislokation durch ein großes Erdbeben an einer solchen Störung das Eintreten des nächsten abschätzen.

Die San Andreas Fault in Kalifornien zum Beispiel ist ein Scherungsrand zwischen der nordamerikanischen und pazifischen Platte (Abb. 2). Der Westteil bewegt sich im groben Durchschnitt gegenüber dem Ostteil um einige cm/Jahr nach Norden. Im südlichen zentralen Teil ereignete sich 1857 ein großes Erdbeben, das stellenweise eine plötzliche horizontale Verschiebung der Blöcke um 9–10 m verschuldete. Da im Durchschnitt die Verformung im Holozän zu 33–64 mm/Jahr bestimmt werden konnte, müßte sich das nächste dortige große Erdbeben in 140–300 Jahren, also eventuell sehr bald ereignen – wenn alles so einfach und linear zugehen würde. Auch wenn keine so eingehenden Messungen vorliegen, kann man mit der sogenannten »Seismic Gap-Methode« Prognosen versuchen. Sie beruht darauf, daß nach kontinuierlicher Zunahme der Verformung schließlich an Störflächen quasizyklisch Beben ausgelöst werden. Fedotov wandte dies 1965 in der Kamtchatka an. Mogi verfeinert die Methode seit 1979 für zeitliche und räumliche Ableitungen. Immer mit dem Prinzip, daß örtlich wie zeitlich die größte Gefahr für ein nahes Großbeben besteht, je länger das letzte zurückliegt. Das schwere Erdbeben ($M = 6,8$) vom 23. 11. 1980 südöstlich Neapel konnte mit dieser Methode kurz vorher im Prinzip angekündigt werden (Berckhemer 1979). Die Methode ist trotzdem noch in einem »embryonalen« Stadium. Für Kalifornien: Seit den letzten 1200 Jahren soll es dort mindestens 8 große Erdbeben gegeben haben, mit einem mittleren Intervall von 140 Jahren. Auch dies warnt vor dem nächsten Jahrhundert.

Direkte Beobachtungen gelten vor allem den Vorläuferbeben und deren Begleiterscheinungen als Vorwarnung. Es werden dabei möglichst kontinuierlich Spannungen, Bodenbewegungen, seismische, gravimetrische oder magnetometrische Parameter gemessen. Der Grundwasserspiegel wird verfolgt; Bodengase werden analysiert, etwa der Gehalt an Radon; das Verhalten der Haustiere wird beobachtet. Alles, um bei sprunghaften Änderungen genauer hinzusehen.

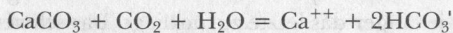
Die bisherigen Erfolge sind freilich bescheiden, und nur wenige Vorhersagen waren präzise. Kommt die Analyse von Vorläuferphänomenen mit lokalen Erfahrungen aus früheren Fällen zusammen, gelingt es, die Seismic Gap-Methode und die Verformungsmessungen zu verbessern, so bestehen wohl am ehesten Aussichten auf Fortschritte. Freilich bleibt jedes Erdbeben ein Individuum, selbst an der San Andreas Fault – viel mehr jedoch bei den derzeit überhaupt nicht faßbaren, so launischen Intraplatten-Beben. Wer übrigens je selbst ein Erdbeben erlebt hat, wird das Emotionale dabei nie vergessen, das Charles Darwin auf seiner Reise mit der »Beagle« in Chile beschrieben hat:

»A bad earthquake at once destroys our oldest associations: the earth, the very emblem of solidity, has moved beneath our feet like a thin crust over a fluid; one second of time has created in the mind a strange idea of insecurity, which hours of reflection could not have produced.«

Klima

Auf S. 397 wurde auf die Fortschritte der Paläo-Ozeanographie in den letzten Jahren hingewiesen. Hier könnte sich eine Möglichkeit ergeben, auch etwas zur Entwicklung des künftigen Klimas auszusagen. Einen theoretischen Ansatz gibt Imbrie (J. geol. Soc. London 1985) für die nächsten 25 000 Jahre. Hier sei einiges zum CO_2 -Problem gesagt. Das Weltmeer spielt beim globalen Kohlenstoffkreislauf eine besonders wichtige Rolle, neben den Pflanzen, Tieren, Gesteinen, der Atmosphäre – und seit der Industrialisierung dem Menschen selbst. Es enthält beispielsweise sechszigmal mehr C (als HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2) als die Atmosphäre. Der Austausch zwischen beiden spielt sich über die einige 100 m mächtige Oberflächenwasserschicht recht rasch ab, in wenigen Jahren. Eine Durchmischung bis zum Tiefseeboden braucht dagegen ein Jahrtausend. Der Ozean als Ganzes reagiert daher träge, vergißt aber irgendwelche Änderungen von außen auch lange nicht, selbst wenn diese rückgängig gemacht werden könnten.

Im Oberflächenwasser wird der CO_2 -Gehalt u. a. beeinflusst durch die Temperatur und die Organismen. In hohen Breiten wird in ihm CO_2 absorbiert, in niedrigen an die Luft abgegeben. Photosynthese, pflanzliche Assimilation, entnimmt C aus dem Wasser. Kalkfällung, etwa durch Korallen oder Bau von Organismenschalen, erhöht den CO_2 -Gehalt im Wasser, Kalklösung, etwa in der Tiefsee, erniedrigt ihn:



Verwitterung, \rightarrow \leftarrow Kalkfällung
Kalklösung

Nun haben Meßreihen gezeigt, daß der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre in den letzten 100 Jahren von rund 290 ppm auf 340 ppm zugenommen hat. Dies wird auf die verstärkte Verbrennung fossilen Kohlenstoffs aus Öl, Erdgas und Kohle, auf die Abholzung vor allem tropischer Wälder, auf die Zerstörung organischer Substanz in den Böden u. ä. zurückgeführt. Der jeweilige Anteil dieser Faktoren an der CO_2 -Zunahme ist aber noch umstritten. Nach den derzeitigen Klimamodellen wird weitgehend angenommen, daß eine weitere Zunahme zu einem Treibhauseffekt, zu einer globalen Erwärmung führt, die evtl. sogar an den Polen höher als der Durchschnitt werden kann. Völlig offen dagegen ist, wie stark und wie schnell diese Erwärmung einsetzen wird. Hier können sicher Modelluntersuchungen durch paläoozeanographische Befunde korrigiert oder gestützt werden, denn die Interglaziale oder gar das Tertiär waren ja Zeiten mit höheren globalen Temperaturen.

Waren aber damals tatsächlich auch die CO_2 -Gehalte der Luft höher? Eiskerne aus Grönland und der Antarktis, deren Jahreslagen zum Teil bis 130 000 Jahre zurückreichen, haben in der Tat hierfür Hinweise erbracht. In der auslaufenden letzten Glazialzeit, also vor 30 000 bis 15 000 Jahren, lagen sie bei 180–200 ppm. Sie stiegen danach rasch auf etwa 300 ppm an und hatten sich bis zur Industrialisierung bei 260–280 ppm eingependelt. Die letzteren Werte konnten aus Baumringuntersuchungen gewonnen werden. Gestützt wird dies neuerdings durch Untersuchungen des $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses von Foraminiferen-

schalen in Tiefseekernen. Auf Einzelheiten dieser noch im Gange befindlichen Arbeiten von Shackleton und anderen soll nicht eingegangen werden.

Zwei naheliegende Vergleiche aus Perioden erhöhter Globaltemperaturen bieten sich an: 1. Im letzten Interglazial war der westantarktische Eisschild verschwunden, was den Meeresspiegel weltweit um 5–7 m gehoben hatte. 2. Der Arktische Ozean war im Tertiär praktisch eisfrei, was die Temperaturen erheblich erhöht und die Klimagürtel der Nordhalbkugel verändert hatte. Wird dies die künftige Situation? Nach uns die Sintflut? Und wann?

Es wird der Trost geäußert, daß das Weltmeer groß genug sei, das anthropogen der Atmosphäre zugeführte CO_2 aufzunehmen. Bisher soll dies aber nur zur Hälfte geschehen sein. Man kann sich leicht vorstellen, daß erhöhtes CO_2 im Tiefenwasser Tiefseekarbonate auflösen und damit der CO_2 -Gehalt nach der obigen Gleichung herabgesetzt wird. Doch dies wird erst nach einem Jahrtausend voll wirksam! Das hilft dann nicht mehr, wenn die obengenannten möglichen Folgen in wenigen Jahrhunderten auftreten. Und darüber kann noch nichts Sicheres gesagt werden, so wenig übrigens wie über das eventuelle baldige Eintreten des Gegenteils, einer neuen Glazialzeit. Immerhin leben wir seit rund 10 000 Jahren in einem Interglazial. Diese Perioden dauerten bisher 10 000–15 000 Jahre.

Auch wenn man geneigt ist, bei all den genannten und ungenannten Ungewißheiten weitere Ergebnisse der – dringend notwendigen – Forschung abzuwarten, und wenn man dazuhin als Geologe die Anpassungsfähigkeit des Lebens an Umweltveränderungen kennt, so ist wohl der Rat nicht verkehrt, schon jetzt zumindest alternative Optionen für die Bereitstellung und Verwendung der Energie vorzubereiten.

Ein Nachwort zu dem bei weiterer Erwärmung abzusehenden Anstieg des Meeresspiegels und damit der Verschiebung der Küstenlinien. Es wäre ein globales Phänomen, wenn auch eigenständige regionale tektonische Bewegungen oder der Effekt unterschiedlicher Belastung von verschieden gestalteten Schelfmeeren und Küstenebenen diesen Anstieg nach Geschwindigkeit und Ausmaß regional variieren werden. – Dies ist übrigens ein interessantes Ergebnis der gegenwärtig weltweit laufenden Untersuchungen zum holozänen (Tab. 1) Meeresspiegelanstieg um über 100 m. Es steht im Widerspruch zu der Ansicht, daß Meeresspiegelschwankungen weltweit synchron verlaufen. Sie beeinflussen natürlich die Sedimentation auf Schelfen (Vail et al., seit 1975), evtl. auch in der Tiefsee (Barron & Keller, 1982) und können zu globalen stratigraphischen Zeitmarken werden, obwohl es sich dabei vor allem um Schichtlücken, Hiatusse, also fehlende Seiten im Buch der Erdgeschichte handelt.

Rohstoffe und Zukunft

Bei Vulkanen und Erdbeben werden Prognosen immer unsicherer, je kleiner die Ausschnitte in Raum und Zeit werden. Die großen Züge sind bekannt. Bei der Abschätzung der Rohstoffressourcen und -reserven (d. h. des nachgewiesenen und derzeit technisch und wirtschaftlich gewinnbaren Teils der Ressourcen) ist fast das Gegenteil der Fall. Die einzelne Erz- oder Erdöllagerstätte muß ja mit ihren Reserven schon vor der Einrichtung eines Bergwerks oder Feldes so weit bekannt sein, daß sich der Einsatz lohnen wird. Diese

Art von Vorhersagen gehört also schon lange zum Handwerk des Geowissenschaftlers oder Bergmanns.

Das Abschätzen der Weltressourcen und selbst der Weltreserven ist nicht nur deshalb kompliziert, weil zumindest Teilzahlen daraus wirtschaftlich und politisch sehr empfindlich sind. Auch einer wissenschaftlichen, objektiven Behandlung stehen außerordentliche Hemmnisse entgegen, selbst bei den *Kohlenwasserstoffen*, die doch an Sedimentbecken gebunden sind, also bei einigermaßen bekannten Volumen derselben und bei Übertragung des durchschnittlichen Öl- und Gasgehalts von bekannten Becken auf unbekannte gute Vorratsschätzungen zulassen sollten. Dies ist aber eine täglich fortzuschreibende Aufgabe, da jede geophysikalische Untersuchung in all diesen Becken und vor allem jede Bohrung unsere Kenntnisse verbessert. Die geschilderten quantitativen Methoden (S. 418) sind viel zu aufwendig, um sie weltweit anwenden zu können. Auf andere Methoden soll hier nicht eingegangen werden. Von der Sicherung der Energieversorgung hängt die Zukunft nicht nur der Industriestaaten ab. Deshalb seien die letzten verfügbaren Zahlen der Reserven von Erdöl, Erdgas und Kohle in Tabelle 2 (S. 416) zusammengestellt.

Noch schwieriger sind diese Abschätzungen für *Erze*, da es recht unterschiedliche Vorstellungen über deren Vorkommen und Erstreckung in größeren Tiefen gibt. Bohrungen – und vor allem Gewinnung – werden mit der Tiefenzunahme im allgemeinen sehr viel teurer als bei den Kohlenwasserstoffen. Wenn die Erze nicht sedimentär entstanden sind, sondern etwa in Gängen, schlägt das Lokale noch stärker durch, trotz der genannten »Erzprovinzen«.

Der Geologe steht indessen nicht direkt vor der Schwierigkeit, die Lebensdauer dieser Vorräte abschätzen zu müssen. Er ist vorsichtig, derzeitige Verbrauchsangaben ohne weiteres in die Zukunft zu projizieren. Neue Technologien bei der Exploration, Gewinnung, aber auch weiteren Verarbeitung der Rohstoffe, ihr Ersatz durch andere oder durch Recycling, der Markt mit seinen Preisen, politische, soziale und andere Einflüsse spielen herein. Schließlich kann im Prinzip jedes Element auch aus größter Verdünnung der Erdkruste entnommen werden, wenn man nur genügend Energie, also auch Geld aufwendet. Derzeit scheint es bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts, also im Jahr 2100, praktisch keine Verknappung zu geben bei Na, Cl, Mg, Br aus dem Meer, bei Mn aus Tiefseeknollen sowie bei Si aus Sanden u. ä., Ca aus Kalken, S aus Gips, Al – mit Ga als Nebenprodukt – aus Tonen, Fe aus Erzen, P aus Phosphaten. Angeblich gilt das nicht – und dies in fallenden Zahlen der Erschöpfung – für Indium, Wismut, Gold, Zink, Silber, Antimon, Kadmium, Blei, Germanium, Quecksilber usw. (Goeller & Zucker, Science 1984). Doch, wie gesagt, spielen so viele Faktoren herein, daß die Spanne zwischen Cassandra und Candide, mit der besten aller Welten, groß ist.

Umweltgeologie

Eine ganze Reihe von Problemen, die man unter diese Überschrift stellen könnte, ist im Vorstehenden schon behandelt worden. Das wichtigste ist, daß der Geologe die derzeit ablaufenden *Vorgänge* besser verstehen lernen und versuchen muß, sie zu quantifizieren. Das beginnt mit der Verbesserung unserer Kenntnisse des Stoffkreislaufs vor allem der

biologisch wichtigen Elemente C, P, N und S. Wie beschrieben, klaffen selbst beim Kohlenstoff noch große Lücken, von denen einige auch der Geologe füllen muß. Stoffkreisläufe verstehen, die zudem biologisch beeinflußt werden, bedeutet eine Fülle noch ungelöster fundamentaler Probleme, vor allem von solchen an Grenzflächen. Was wissen wir wirklich quantitativ von der Verwitterung in den verschiedenen Klimazonen, was von der Bodenbildung mit der Wechselwirkung zwischen Gesteinsbruchstücken, Grundwasser, Bodenluft, Mikro- und Makroorganismen? Wie wirkt sich das Alter der Bodendecke aus? Die Zufuhr frischen Materials ist ja für die Fruchtbarkeit entscheidend, wie in früher gletscherbedeckten Bereichen oder um junge Vulkane, wie es auch Nietzsche (S. 423) richtig sah. Im Innern alter Schilde in den Tropen hat die dort so intensiv und lange Zeit aktive chemische Verwitterung wenig Nährstoffe übriggelassen. Was geschieht, wiederum quantitativ, unter all diesen Böden, schließlich im Grundwasser und in einer Welt, die offensichtlich noch voller Überraschungen steckt, d. h. in den Bereichen von mehr als einigen Kilometern Tiefe? Wo zirkulieren dort überhaupt Wasser, welche Mengen, wie rasch? Da radioaktiver und sonstiger toxischer Abfall nicht in den Wasserkreislauf einbezogen werden darf, sind das aber wichtige Fragen für die Zukunft.

Der zweite Punkt: Der Geologe muß fortfahren, für Umweltfragen wichtige *Tatbestände* in geeigneter Form, in allgemeinverständlichen Karten und Profilen darzustellen. Immer mehr wird der Mensch Kompromisse schließen oder Alternativen wählen müssen: Kiesgewinnung für Bauzwecke oder Gewinnung von Grundwasser aus den Kiesen unter derselben Fläche? Siedlungen oder Tagebaue? Und: Nützen verlangt Schützen, nicht nur bei Tieren und Pflanzen, auch bei der Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen.

Schlußbemerkungen

Am Schluß dieser Betrachtungen sei darauf hingewiesen, daß vieles darin stark vereinfacht und schematisiert werden mußte. Doch die Grundprobleme wurden dadurch vielleicht sogar deutlicher. Durch viele Fragen im Text wurde versucht, auf Lücken unserer Kenntnisse und derzeit anzugehende und auch angebbare Probleme hinzuweisen.

Wie auch in anderen Wissenschaftszweigen beruht der Fortschritt in den letzten Jahrzehnten vor allem auf zwei Tatsachen: Die Geologie und Paläontologie traten heraus aus ihren Einseitigkeiten und pflegten engere Zusammenarbeit mit der Geophysik, Mineralogie, Petrologie, Geochemie. Und ferner: Neue, oft von außen übernommene Methoden und Geräte brachten neue Daten und Beobachtungen, die eine Deutung verlangten.

Das Wichtigste bleiben natürlich trotzdem neue Ideen. Der entscheidende Umbruch war das Umsichgreifen der neuen Hypothesen aus den Ozeanen und deren Überprüfung. Man braucht bei dieser Feststellung gar nicht auf moderne Wissenschaftstheoretiker zu verweisen. Schon 1938 schrieb der Geologe von Bubnoff:

»Die logische Kontinuität der Wissenschaft ist nur ein frommer Wunsch; das Fortschreiten der Erkenntnis ist sprunghaft und irrational. Gedanken sterben nicht, weil sie falsch

sind, sondern weil sie keine Nahrung finden, und werden neu geboren und entwicklungsfähig, wenn ein Nährboden vorhanden ist.«

Der sicherlich nie endende fachliche Dialog in der Geologie selbst bleibt im Ansatz dieselbe Frage, nach kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Entwicklung. Die diskontinuierliche ist spektakulärer. Seltene Ereignisse, gar Katastrophen, prägen sich in der Natur wie in unserem Lebenslauf tiefer ein und manchmal auch aus als das alltägliche Geschehen. Beides hat der Geologe im Auge. Was ist wichtiger? Unter welchen Bedingungen? Heilt das endlose Hin und Her des Wassers am Meeresstrand die episodischen Sturmschäden?

Die Antwort liegt zum Teil im angelegten Zeitmaßstab. Für die nächste Jahrmillion kann wohl recht sicher vorausgesagt werden. Wieweit sich durch die Relativverschiebungen an der San Andreas Fault Los Angeles an San Franzisko angenähert haben wird, aus dieser Sicht kontinuierlich. Doch welche Katastrophen werden sich dabei durch die diskontinuierlichen und so schwer vorhersehbaren Rucke im Untergrund, durch die Erdbeben ergeben! Das stochastische Element findet sich aber auch in fast allen weiteren Kapiteln, die im Vorstehenden behandelt werden konnten. Deshalb bleibt bei allem Fortschritt mit quantitativen Methoden im Bereich so komplexer Zusammenhänge die Unsicherheit bei der Ableitung von Regeln oder Gesetzen und deren Extrapolation in die Zukunft. Nicht die *Gesetze*, nach denen die einzelnen zusammenspielenden Faktoren wirken, ändern sich in der Zeit. Diese können in weitem Umfang durch exakte Methoden aufgeklärt werden. Das *Gewicht* der Einzelfaktoren indessen ändert sich. Dabei kann man so skeptisch sein wie der Mathematiker Thom, wenn er zur Plattentektonik erwähnt (1978):

»Kausalität ist ein Konzept, das uns auf falsche Wege führt, denn es ist intuitiv klar, wogegen aber die Wirklichkeit immer aus einem Netz subtiler Wechselwirkungen besteht.«

Umgekehrt erwächst gerade aus neuen mathematischen Verfahren und physikalischen Ableitungen die Hoffnung, daß die den Geologen so fesselnden Strukturen, die Gestalt, in der Synergetik, der Lehre vom Zusammenwirken, neu gesehen und behandelt werden können. Dann bleiben vielleicht Gesteinsfalten im Gebirge nicht nur erstarrte Bewegung, Konvektionsströme im Erdmantel nicht nur eine Vermutung, die zeitliche Abfolge der Umkehrungen des Erdmagnetfeldes oder der großen Eiszeiten nicht ein Zufall, Fossil-schalen nicht nur Zeugen vergangener Anpassung an physiologische oder ökologische Vorgaben. Formenvielfalt, viele Komponenten, instabil werdende Zustände offener Systeme sind dabei überall beteiligt. Es keimt die Hoffnung auf, daß aus dieser neuen physikalischen Sicht doch einmal Teile der Erdgeschichte in Richtung auf gesetzmäßige Abläufe aufgearbeitet werden können.

Weiterführende Literatur

1. Grundlagen mit zahlreichen Literaturangaben werden in deutschen Lehrbüchern gegeben. Beispiele:

- Brinkmann, R., et al (Hrsg.): Lehrbuch der Allgemeinen Geologie Bd. 1: 1974 (2. Aufl.); 2: 1972; 3: 1967, Stuttgart
- Brinkmanns Abriß der Geologie: Bd. 1: Allgemeine Geologie (Zeil), 1984 (13. Aufl.), Bd. 2: Historische Geologie (Krömmelbein), 1977 (10./11. Aufl.), Stuttgart
- Bender, F. (Hrsg.): Angewandte Geowissenschaften Bd. 1: 1981; Bd. 3: 1984, Stuttgart
- Seibold, E.: Der Meeresboden 1974, Berlin etc., ... mit W. H. Berger: The Sea Floor, 1982, Berlin etc.

2. Neuere Übersichtsdarstellungen von Teilgebieten, in Auswahl:

- Bach, W. et al. (Hrsg.), 1983: Carbon Dioxide: Current Views and Developments in Energy/Climate Research; Dordrecht etc.
- Belousov, V. V., 1981: Continental Endogenous Regimes; Moskau (russ. 1978).
- Coleman, R. G., 1977: Ophiolites: Ancient oceanic Lithosphere? Berlin.
- Emiliani, C. (Hrsg.), 1981: The Sea, Vol. 7; New York.
- Fuchs, K. et al. (Hrsg.), 1983: Plateau Uplift. The Rhenish Shield – A Case History; Berlin etc.
- Giese, P. (ed), 1984, Ozeane und Kontinente. – Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung. Heidelberg.
- Hallam, A., 1983: Great Geological Controversies; New York
- Hansen, J. E., Takahashi, T. (Hrsg.), 1984: Climate Processes and Climate Sensitivity; Geophysical Monographs 29, Maurice Ewing Vol. 5, Amer. Geophys. Union, Washington D. C.
- Hsü, K. (Hrsg.), 1982: Mountain Building Processes; London
- Kennett, J. P., 1982: Marine Geology; Englewood.
- Labesse, B. (Hrsg.), 1984: Des Océans aux Continents – Colloque Saint-Cloud 20. – 21. 11. 1982; Bull. Soc. Géol. France (7) XXVI, 3.
- Le Pichon, X., Francheteau, J., Bonnin, J., 1973: Plate tectonics; Amsterdam.
- Malone, T. F. Roederer, J. G., 1984: Global Change. Proceedings ICSU Symposium Ottawa, 25. 9. 1984, ICSU Press.
- Moores, E. M. (Hrsg.), 1983: Geology – Past and Future; Geology, 679–691.
- Odin, G. S. (Hrsg.), 1982: Numerical Dating in Stratigraphy; Chichester.
- Seibold, E., Meulenkamp, J. D. (Hrsg.), 1984: Stratigraphy Quo Vadis? AAPG Studies in Geology, 16, IUGS Special Publication 14, Tulsa.
- Trümpy, R., 1985: Die Plattentektonik und die Entstehung der Alpen; Nat.forsch. Ges. Zürich, Viertel J.-Schrift, Heft 5.
- US Geodynamics Committee, 1983: The Lithosphere; Report of a Workshop; National Academy Press, Washington D. C.
- US National Research Council Geophysics Study Committee: Continental Tectonics: B. C. Burchfield et al., 1980; Climate in Earth History: W. H. Berger et al., 1982; Explosive Volcanism: Inception, Evolution, and Hazards: F. R. Boyd, 1984.

3. Es war in dem vorgegebenen Rahmen nicht möglich, alle Aussagen zu belegen. Einige wenige und einfacher zugängliche Verweise finden sich gekürzt im Text. Hinweise auf neueste Entwicklungen verdanke ich vor allem den Vorbereitungen für den 27. Internat. Geol. Congress, Moskau, August 1984. Die entsprechenden Kollegen werden genannt in E. Seibold: Advances in Geological Science (1980–1984); Episodes 7, 3. Sept. 1984.

ALEXANDER TODD: Organic Chemistry
(Yesterday, Today and Tomorrow)

MANFRED EIGEN: Stufen zum Leben
Die Entstehung des Lebens aus molekularbiologischer Sicht

EUGEN SEIBOLD: Geologie im Umbruch

HUBERT MARKL: Evolution und Freiheit – Das schöpferische Leben

CHRISTIAN VOGEL: Evolution und Moral

EPHRAIM KATCHALSKI-KATZIR: Impact of Basic Research on Modern Biotechnology

DETLEV PLOOG: Unser Gehirn – das Organ der Seele und der Kommunikation

LUDWIG E. FEINENDEGEN: Mensch und Strahlung

LEWIS THOMAS: The Scale and Scope of Biomedical Science

WOLFRAM FISCHER: Was heißt und zu welchem Ende studiert man Wirtschafts- und Sozialgeschichte?

HERBERT GIERSCH: Elemente einer Theorie weltwirtschaftlicher Entwicklung

PAUL A. SAMUELSON: The Present State of Economic Science and its Probable Future Development

SIDNEY L. JONES: Cooperation and Competition in an Integrated World Economy

BERND RÜTHERS: Arbeitsrecht und Arbeitsmarkt
Das Problem der Verschränkung ökonomischer Verhaltensweisen und rechtlicher Rahmenbedingungen

SEYMOUR MARTIN LIPSET: Historical Traditions and National Characteristics:
A Comparative Analysis of Canada and the United States

EDWARD SHILS: The Universality of Science

KARL DIETRICH BRACHER: Die Ausbreitung des Totalitarismus im 20. Jahrhundert
Ideologien und Realitäten

DOLF STERNBERGER: Politie und Leviathan
Ein Streit um den antiken und den modernen Staat

GÜNTER BUSCH: Grab oder Schatzhaus
Ein Kapitel Museumsgeschichte im Spiegel zweier Bilder

CARL DAHLHAUS: Warum ist die neue Musik so schwer verständlich?
Plädoyer für ein historisches Verständnis

HELMUT THIELICKE: Die Degeneration unserer Freiheit
Zur Diagnose und Therapie einer Zeitkrankheit

GÜNTHER PATZIG: Ethik und Wissenschaft

HERMANN LÜBBE: Die Wissenschaften und die Zukunft unserer Kultur